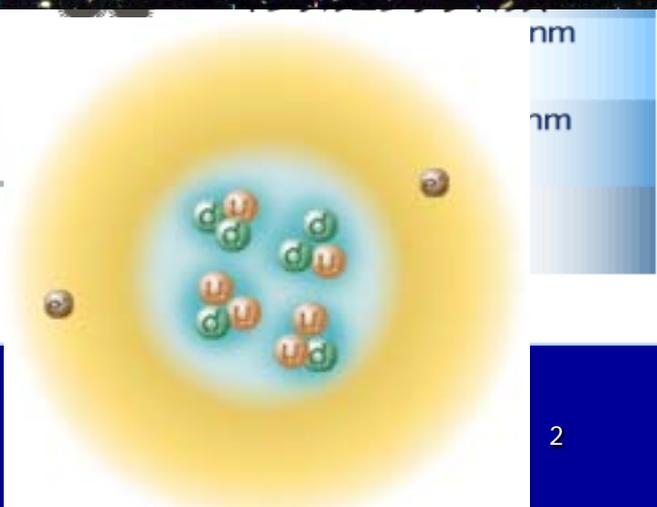
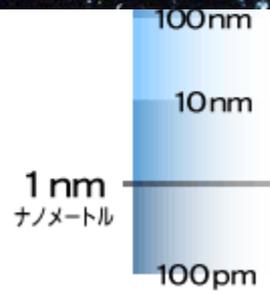
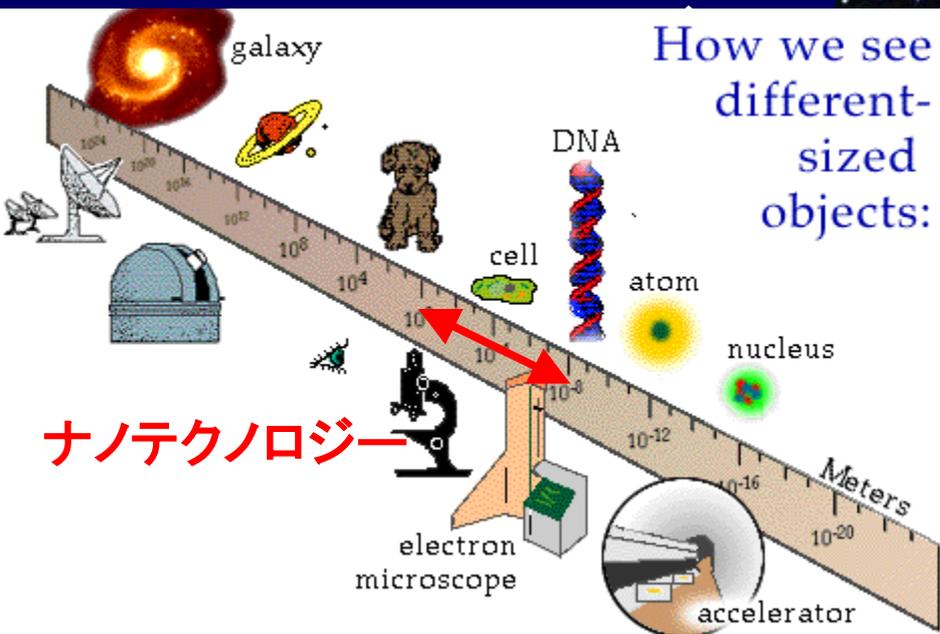


現代の素粒子像
第3回「素粒子と宇宙
—過去と未来—」

中家 剛

今日の講義

大きな世界

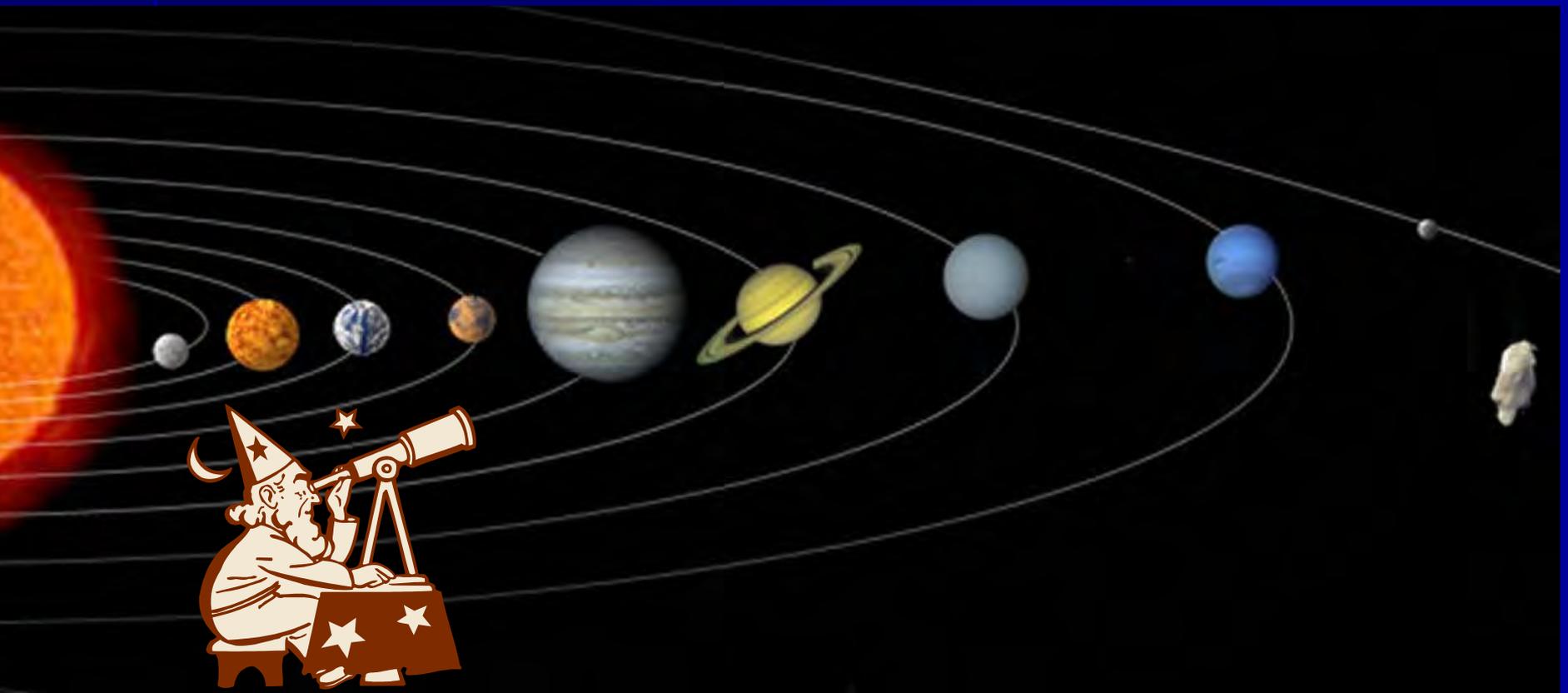


小さな世界

宇宙

宇宙

- 光が1年で進む距離＝1光年
- 海王星・冥王星までの距離
 - ～50万km (～12光時→ ～0.001光年)



散開星団プレアデス(すばる) : 140個以上の星の集団
440光年の距離



星の総数は1000億個

太陽系

2万5千光年

A diagram of the Milky Way galaxy, showing its spiral structure and central core. A red double-headed arrow points from a small blue circle representing the Sun to the bright yellow core of the galaxy. The text '2万5千光年' is written above the arrow.

私たちの銀河系 (小久保英一郎、加藤恒彦提供)

アンドロメダ銀河



東京大学木曾観測所

すばる望遠鏡提供

ヒクソン・コンパクト銀河群40
3億光年の彼方、3億年前の光

銀河群 50個以下の銀河の集団

Hickson Compact Group 40

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

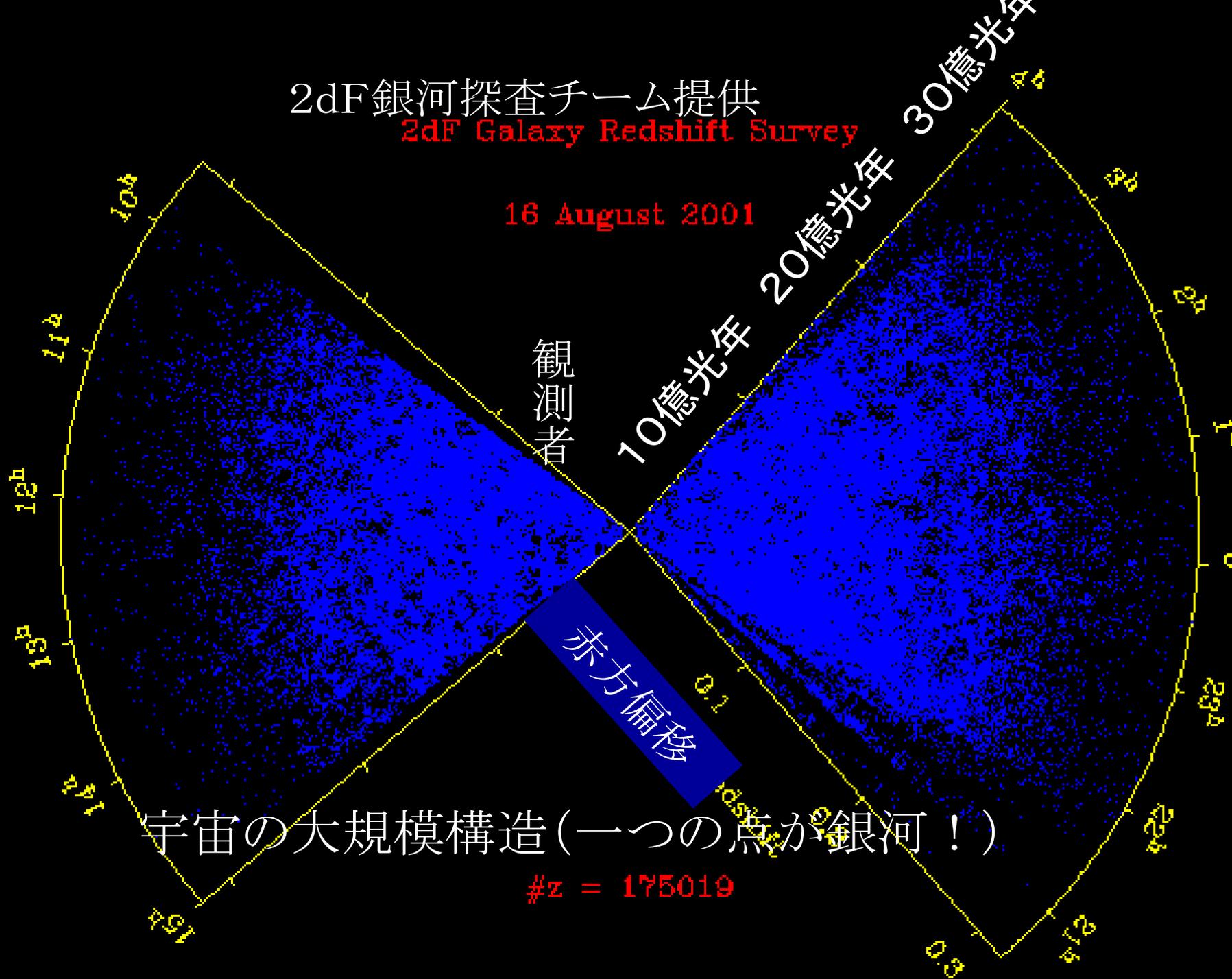
CISCO (J & K)

January 28, 1999



2dF銀河探査チーム提供
2dF Galaxy Redshift Survey

16 August 2001



観測者

10億光年 20億光年 30億光年

赤方偏移

宇宙の大規模構造(一つの点が銀河!)

#z = 175019

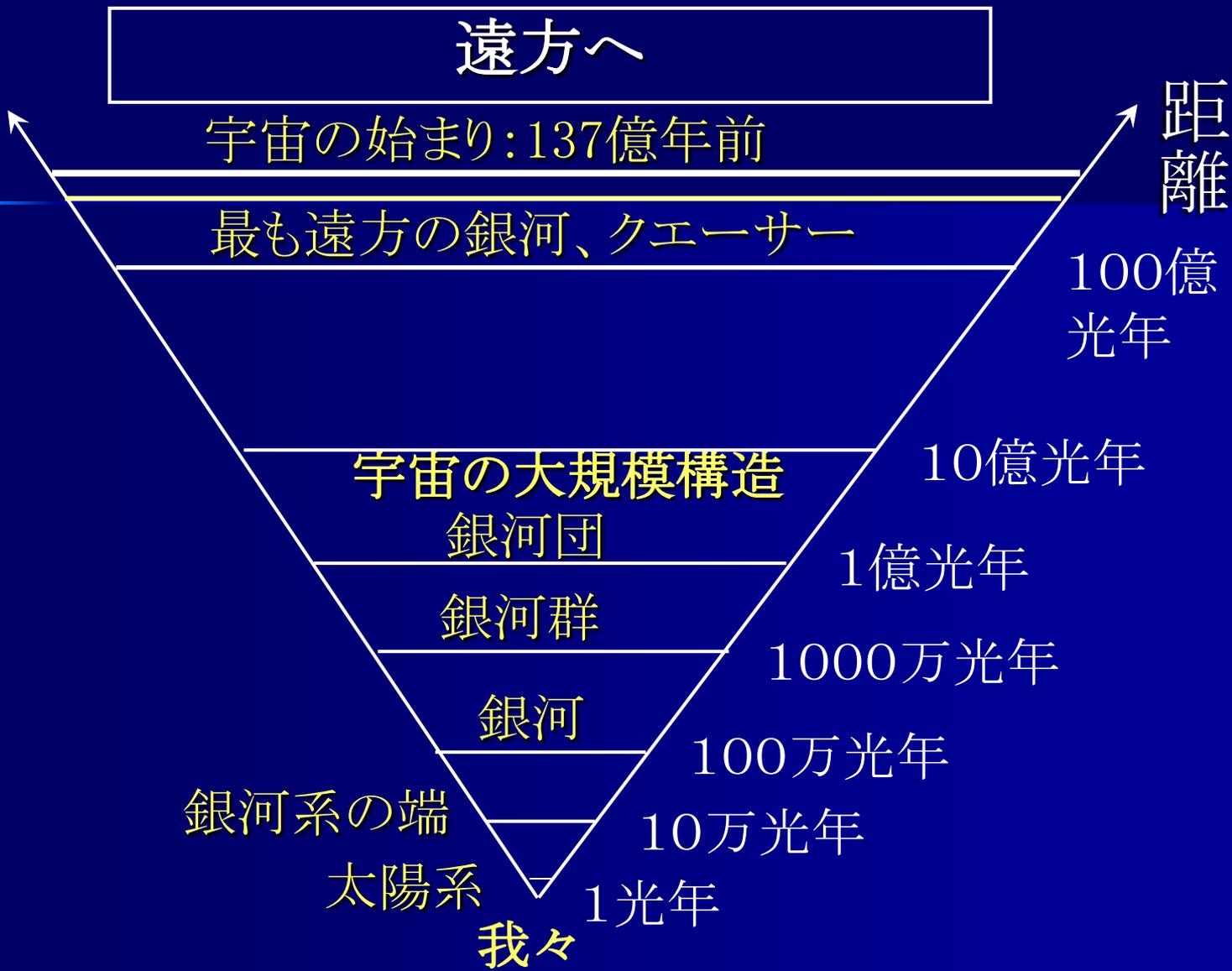
The image is a composite of many smaller images, creating a dense field of galaxies. The galaxies vary in color, including bright yellows, oranges, reds, and blues. Some are large and bright, while others are tiny and faint. The background is a deep, dark black, making the individual points of light stand out sharply. The overall effect is a rich, multi-colored tapestry of distant cosmic objects.

ハッブル宇宙望遠鏡が見た
およそ30億年から130億年前の光

Hubble Deep Field

ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

HST WFPC2



宇宙の不思議

- 宇宙は(加速)膨張している。
- 宇宙には闇黒物質が一杯。

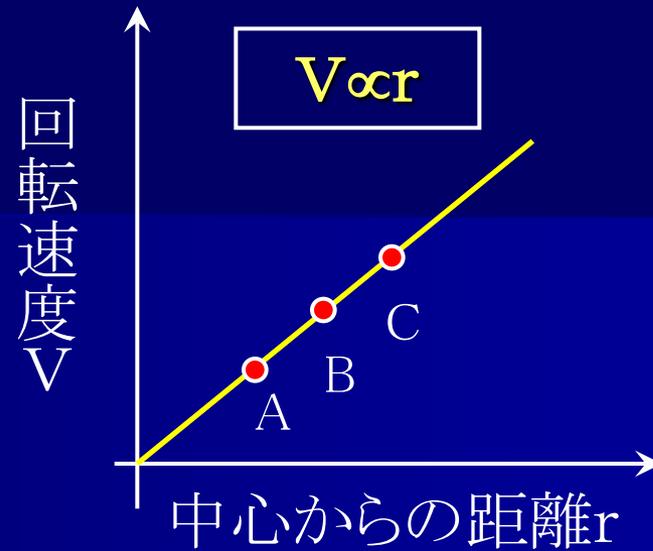
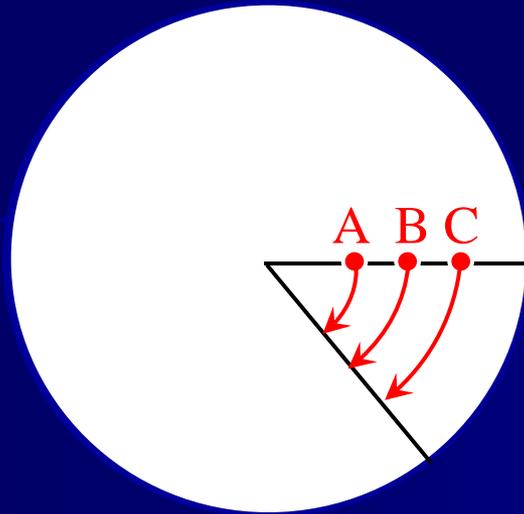
質量の直接測定

- 渦巻銀河の回転曲線
- 重力レンズ効果

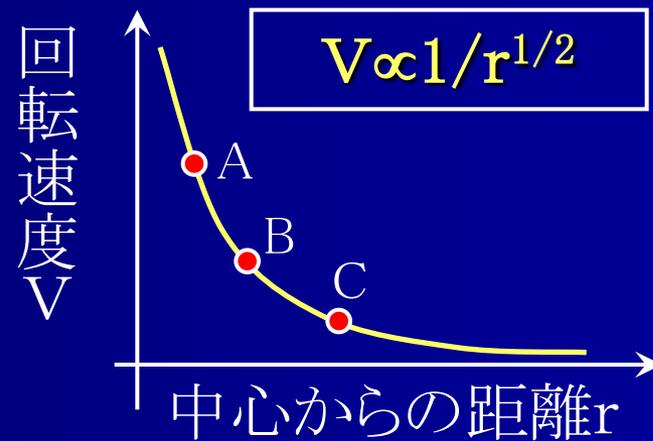
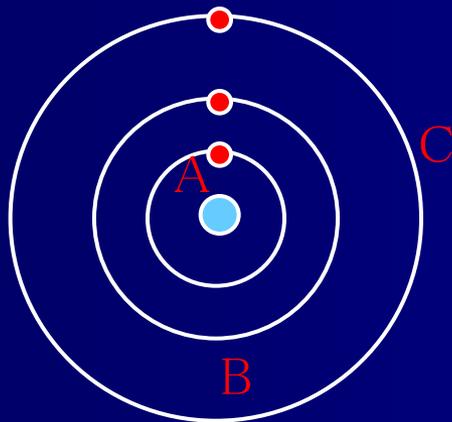
光っている星やガス以外の物質！

- 宇宙から反物質が消えた？
- 宇宙には・・・

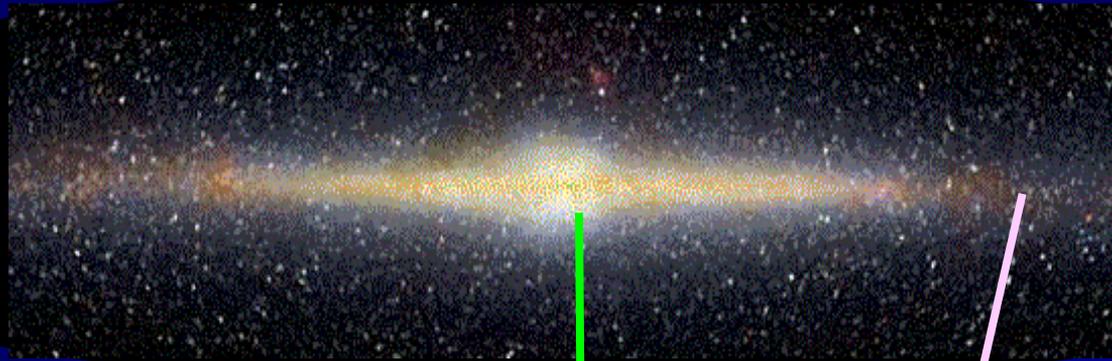
剛体回転(車輪タイプ)



ケプラー回転(惑星タイプ)



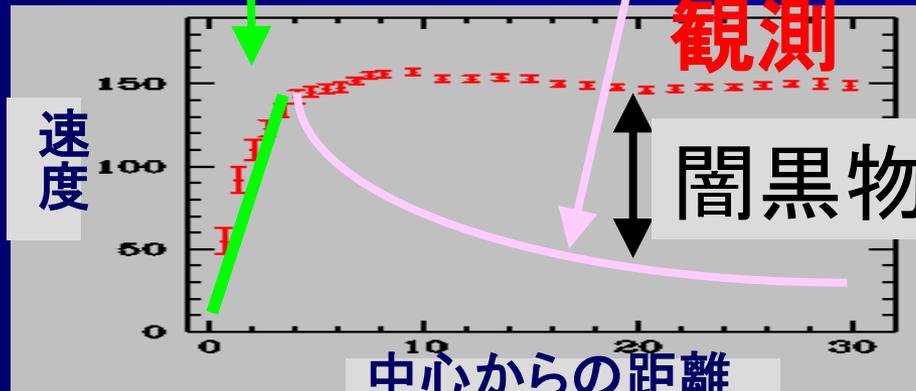
期待される銀河の回転曲線の形



剛体回転

ケプラー回転

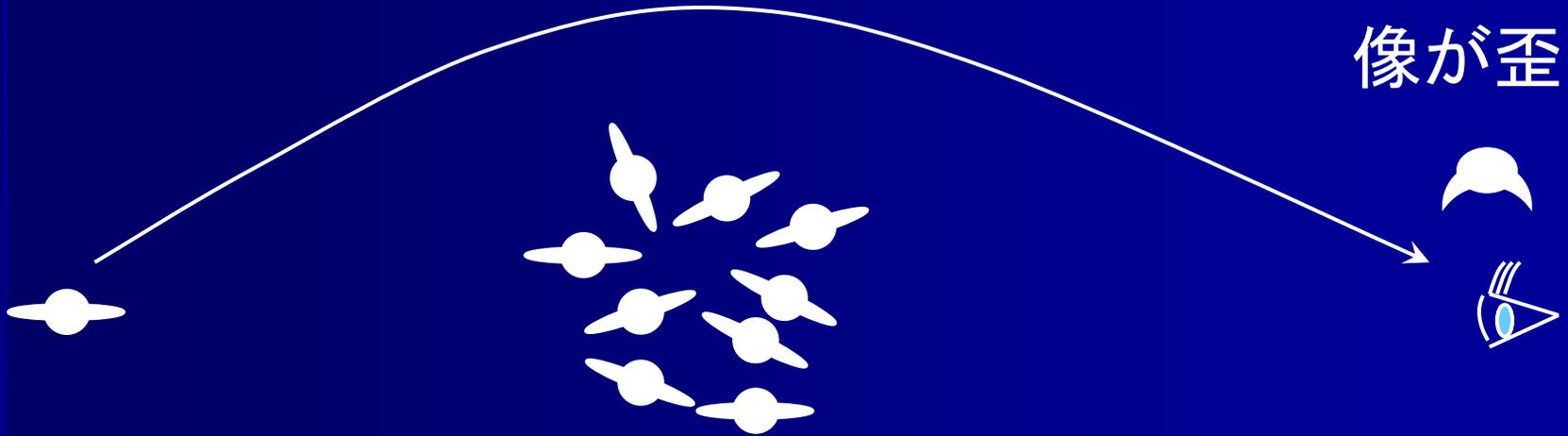
観測



重力レンズ効果を 質量の測定に使う

光の経路曲げられる

像が歪む



遠方の銀河

銀河団(質量集中)

観測者



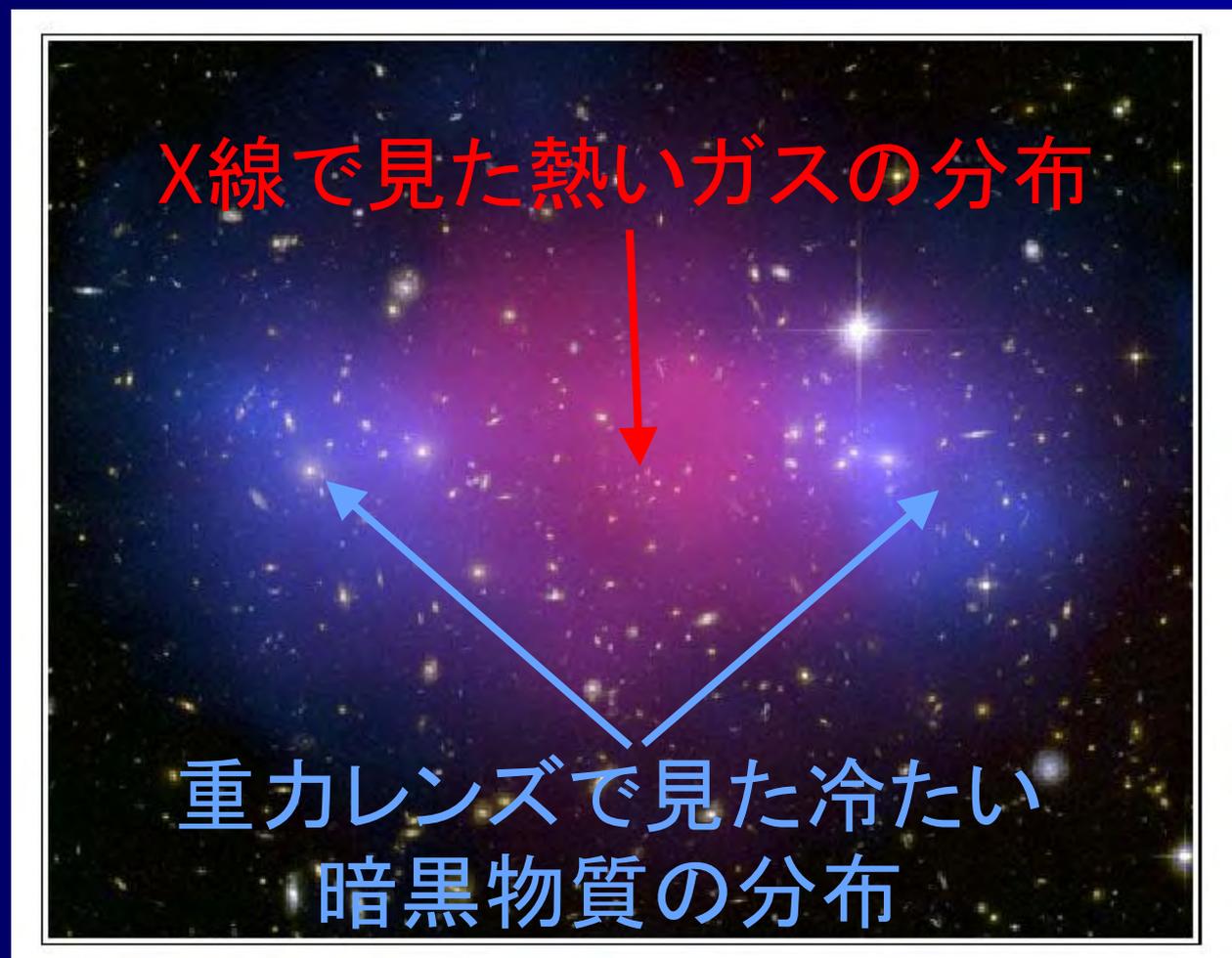
Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

ハッブル宇宙望遠鏡が発見した
重レンズ効果

銀河団の衝突



暗黒物質の最有力候補は未発見の素粒子 (超対称性粒子等:LHCで見つかるか?)

地球上で原子核との散乱を探す。

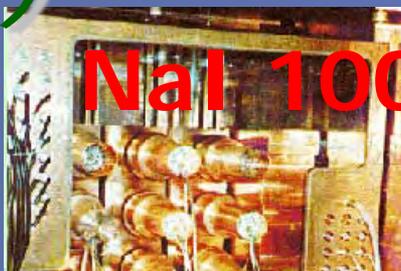
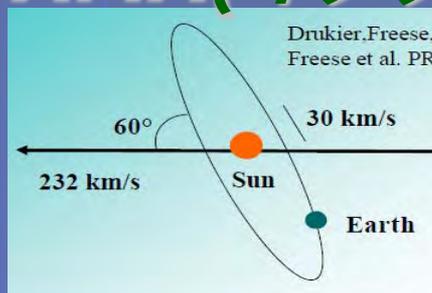
暗黒粒子X

原子核

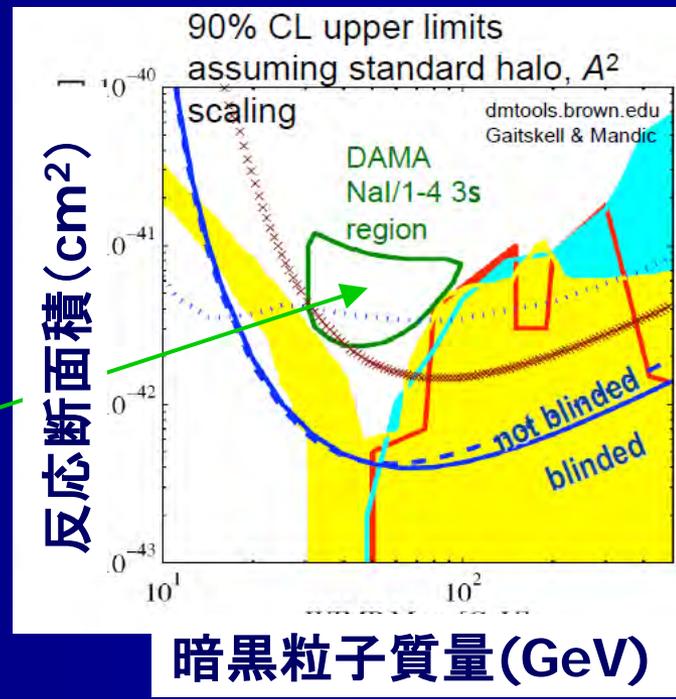
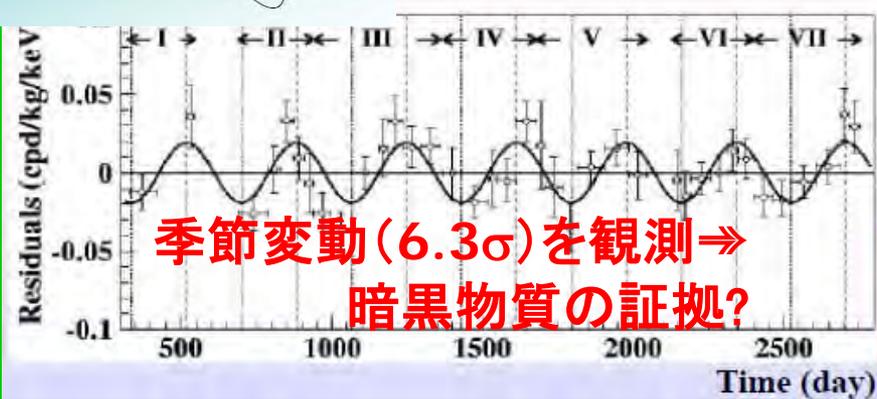


衝突: 原子核が反跳エネルギーを持つ。

DAMA (イタリア)



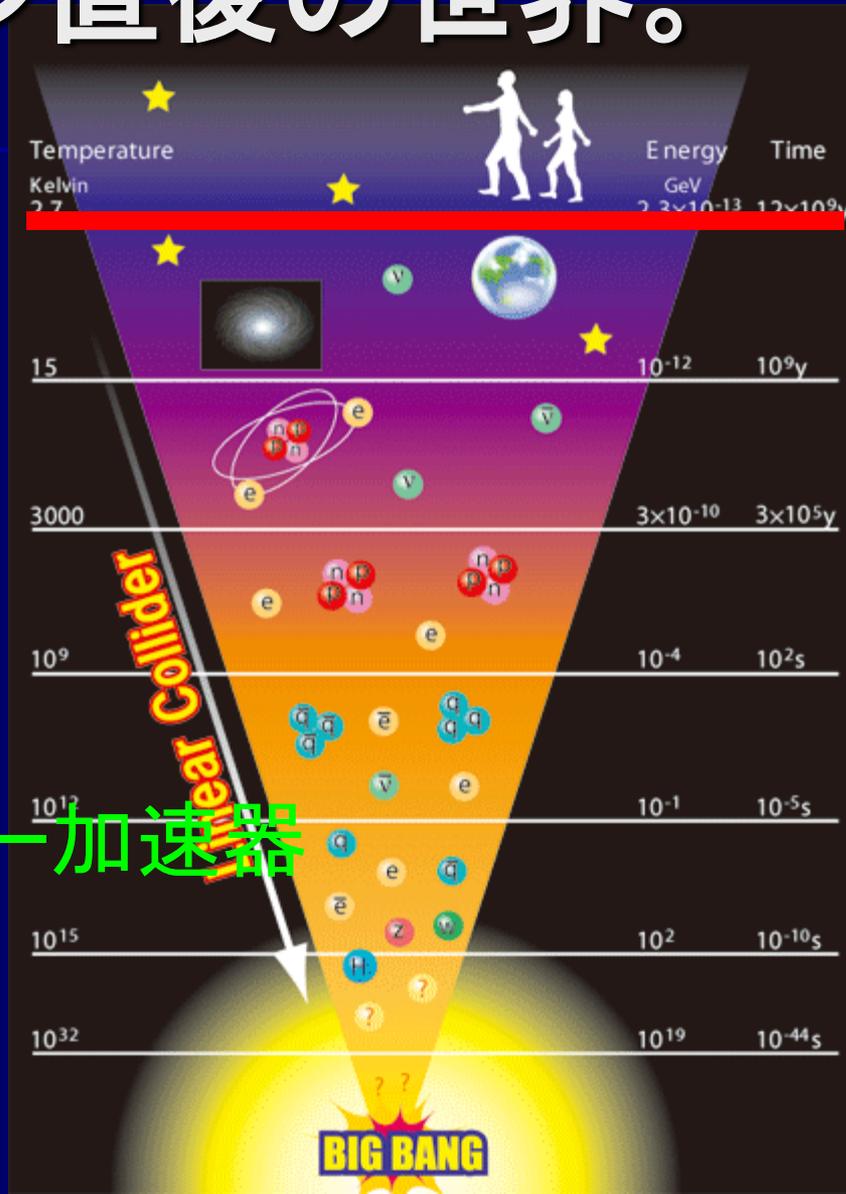
NaI 100kg



高エネルギー加速器で迫るビッグバン直後の世界。

現在

3K



1.3×10^{10} 年

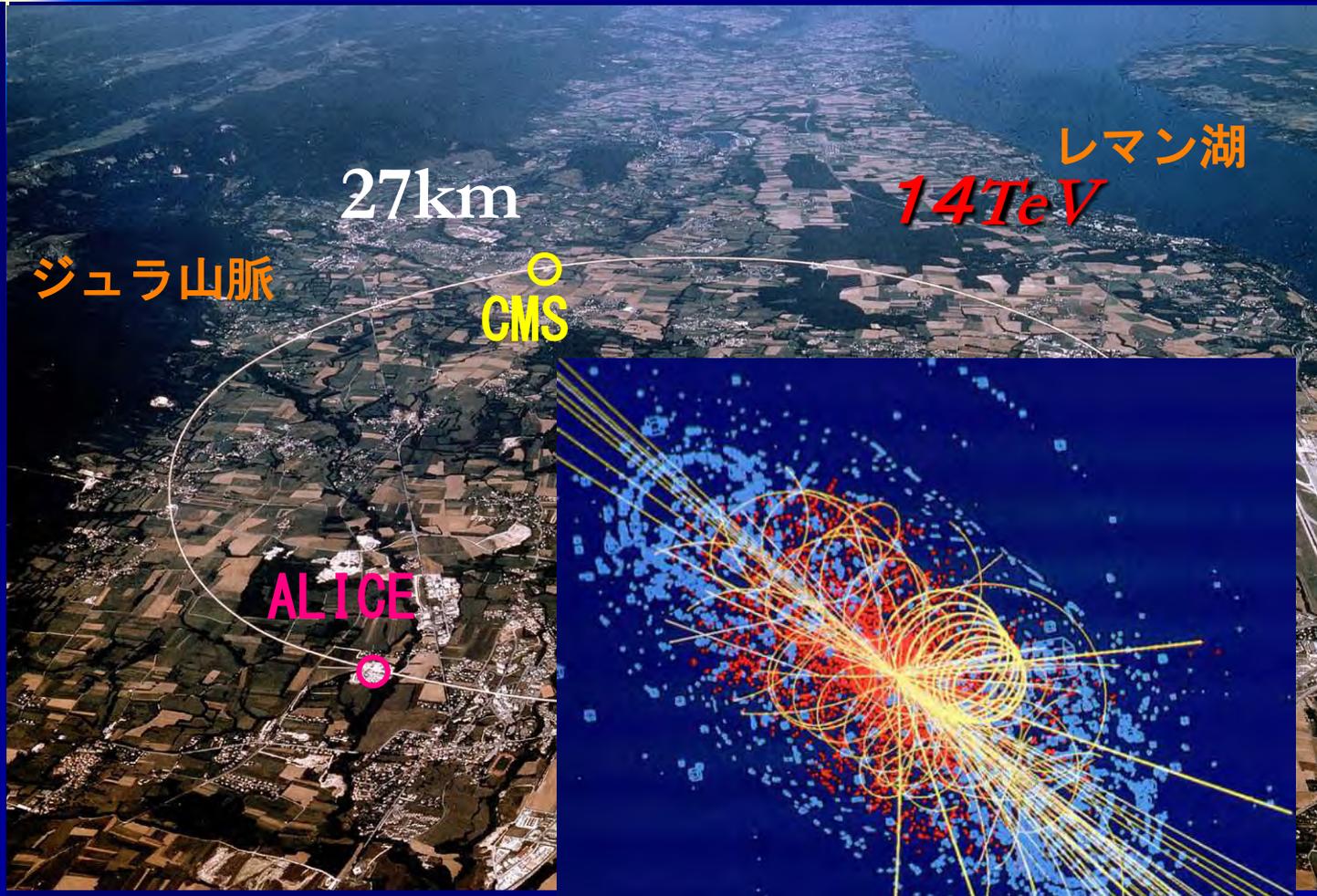
高エネルギー加速器

10^{16} K

$\sim 10^{-10}$ 秒
(0.1ナノ秒)

■ LHC (Large Hadron Collider): 2007年稼動

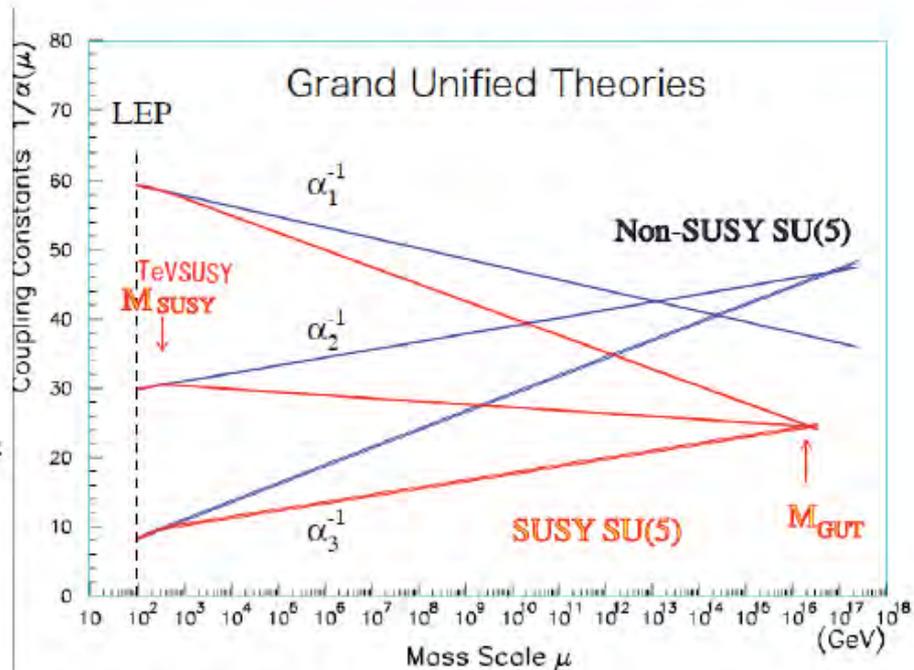
闇黒物質の候補の新粒子が一杯できるかも？



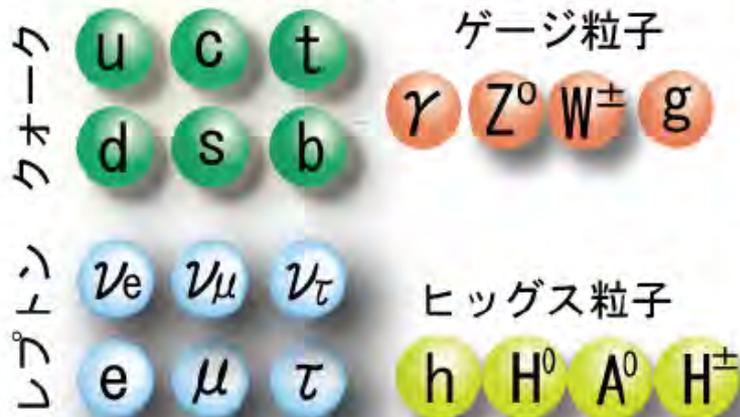
SuperSymmetry

TeV 程度質量をもつ超対称性粒子の御利益

- 力の大統一(GUT)を実現
- 一番軽い超対称性粒子は安定
(暗黒物質の良い候補)
- スカラー場(ヒッグス)の質量を対称性で制御(2次発散の抑制)
- 局所SUSY - 重力を取り込んだ理論



通常の素粒子



超対称性粒子

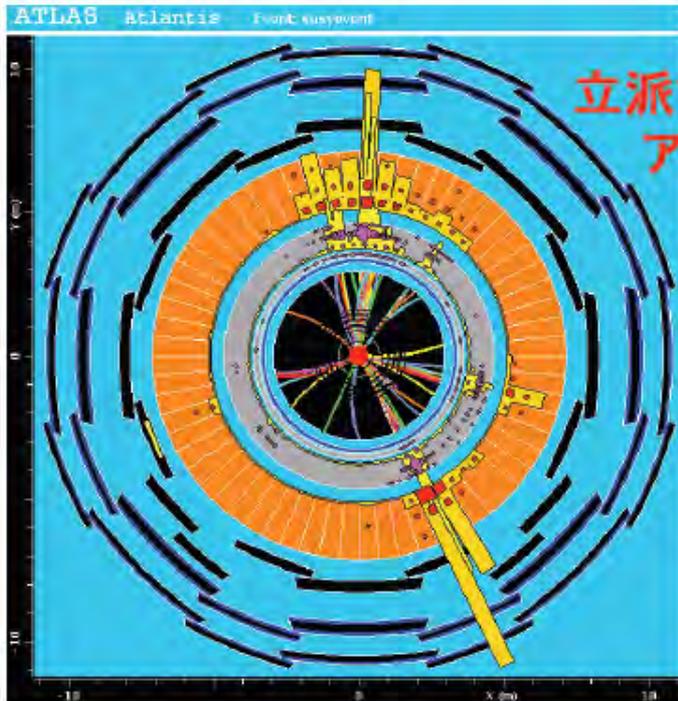
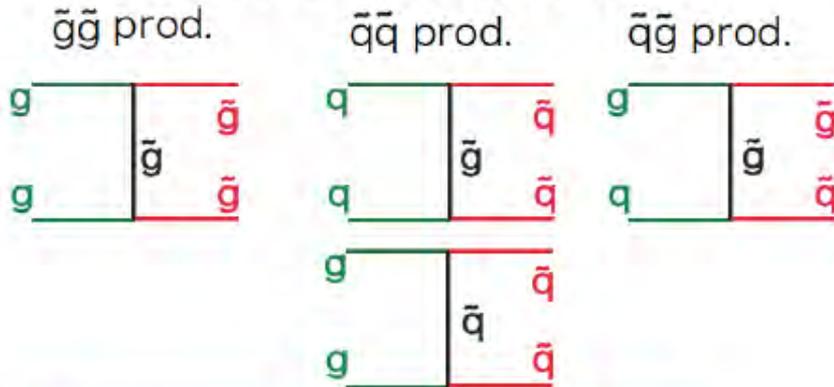


ヒッグス、超対称性粒子は未発見

Spin 1/2 ずれた "SUSY 粒子"

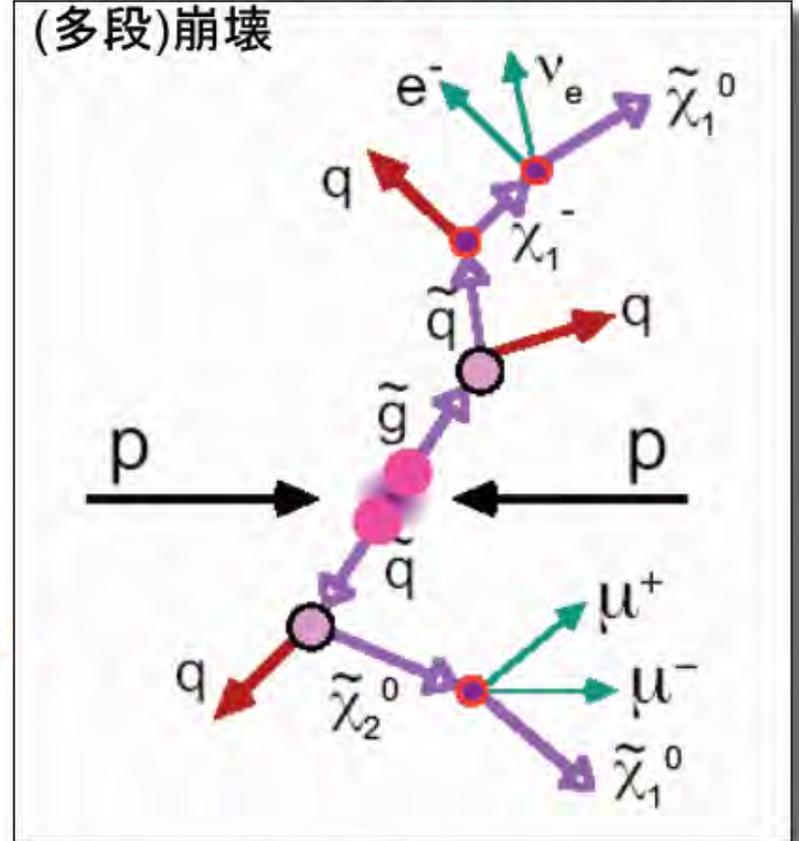
期待される Events topology

強い相互作用で生成



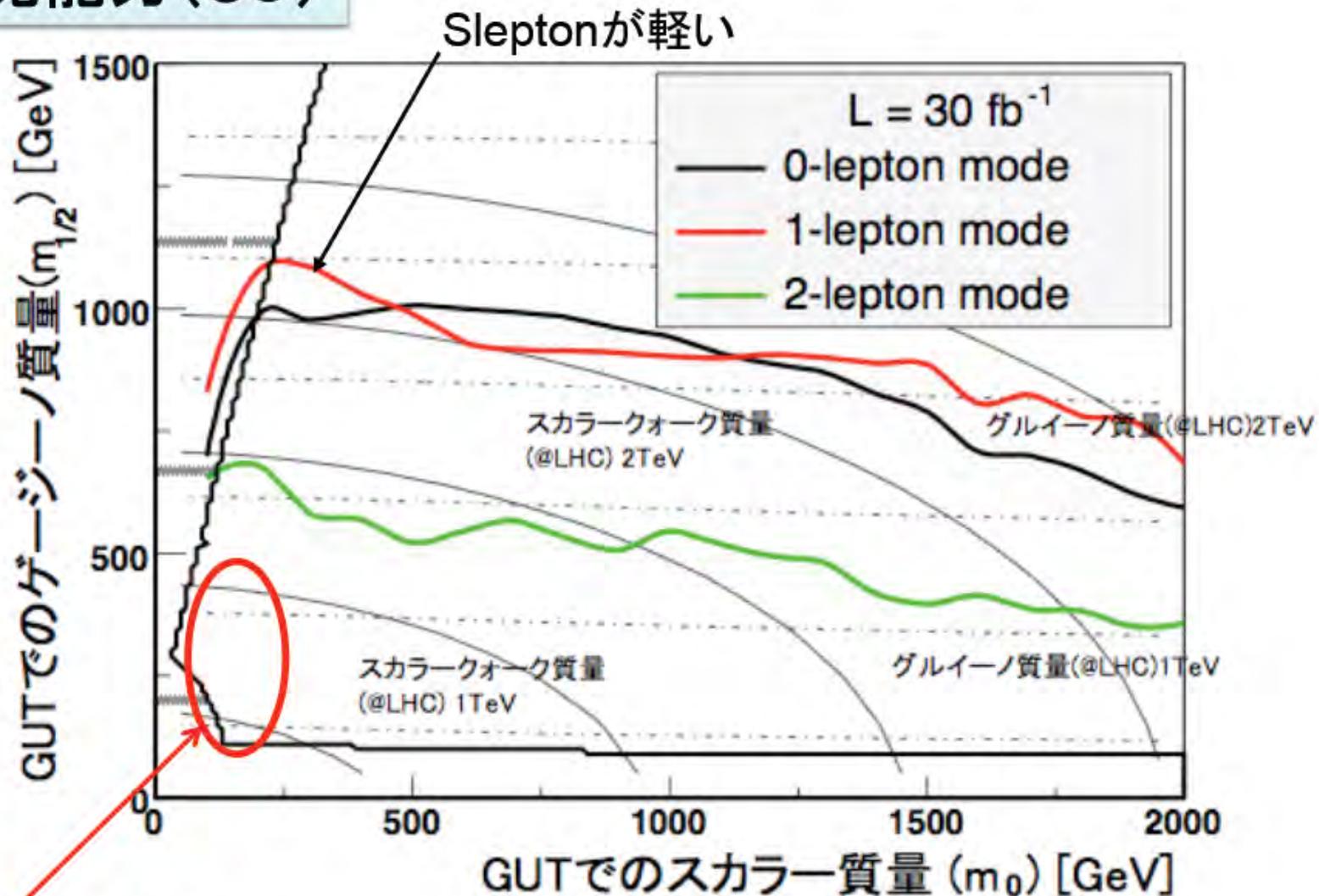
立派で
アンバランス

カスケード: より軽いSUSY粒子へ
(多段)崩壊



LSP: 一番軽いSUSY粒子 安定で
ニュートリノの様に弱い相互作用
検出できない
高い運動量を持ったジェット 複数
LSPが最後2個 → 消失運動量 (mE_T)

発見能力(5 σ)



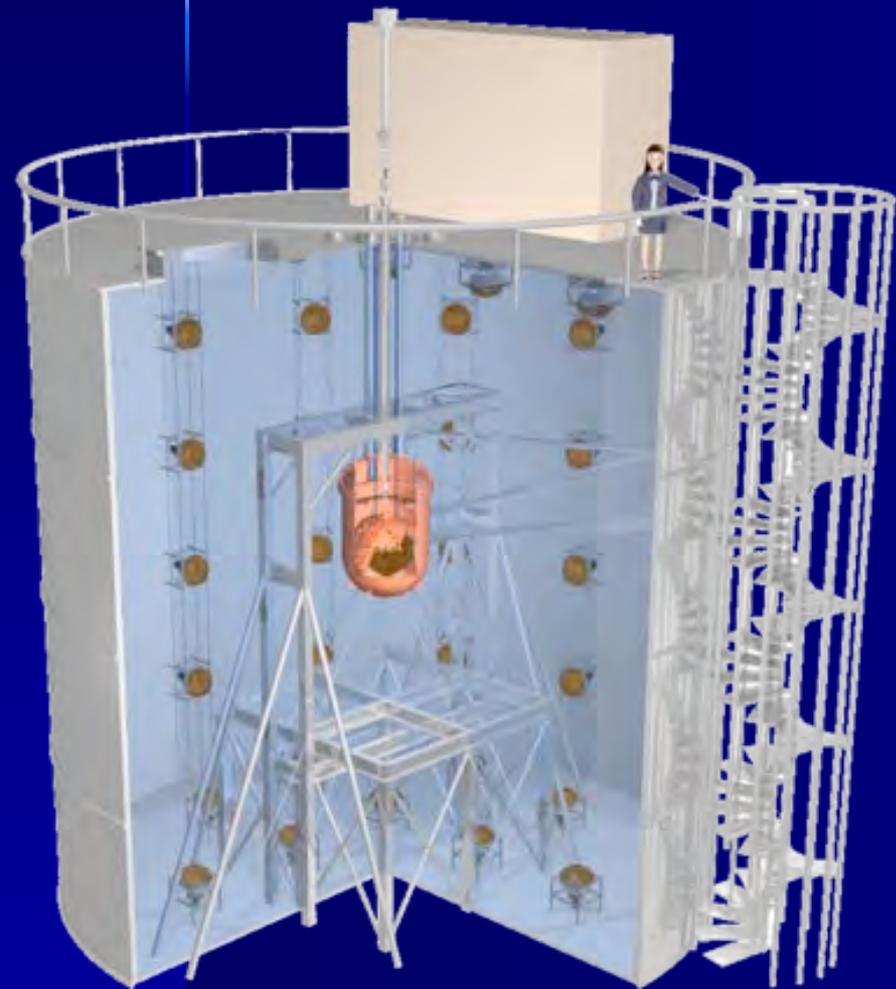
暗黒物質として
都合がよい領域
(2010-11頃にカバー)

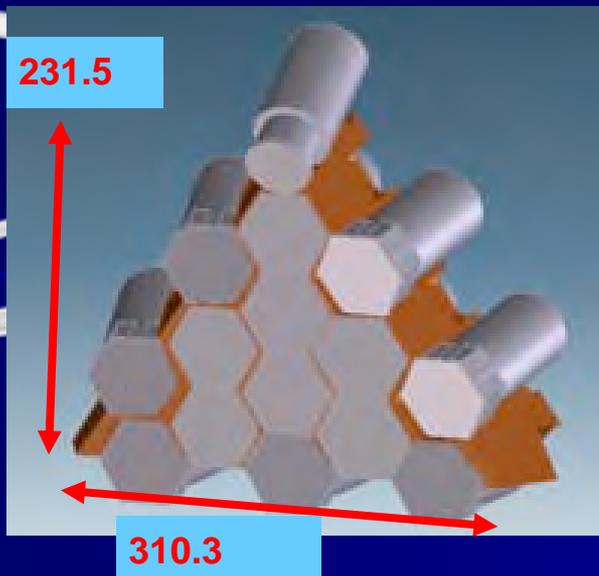
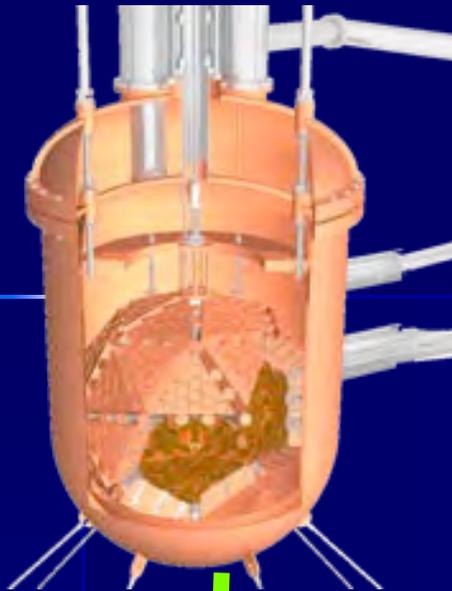
1.5 TeVまで発見
2-2.3 TeV
2.7 TeV

L=1fb⁻¹
L=30fb⁻¹
L=300fb⁻¹

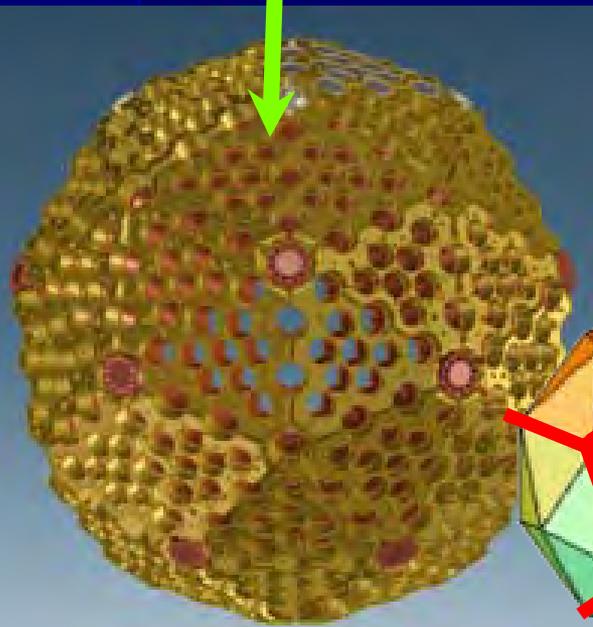
地下での暗黒物質探索(日本)

- 神岡の地下でXMASS実験が準備中！





Hexagonal PMT
Hamamatsu R1078
QE 28-39%



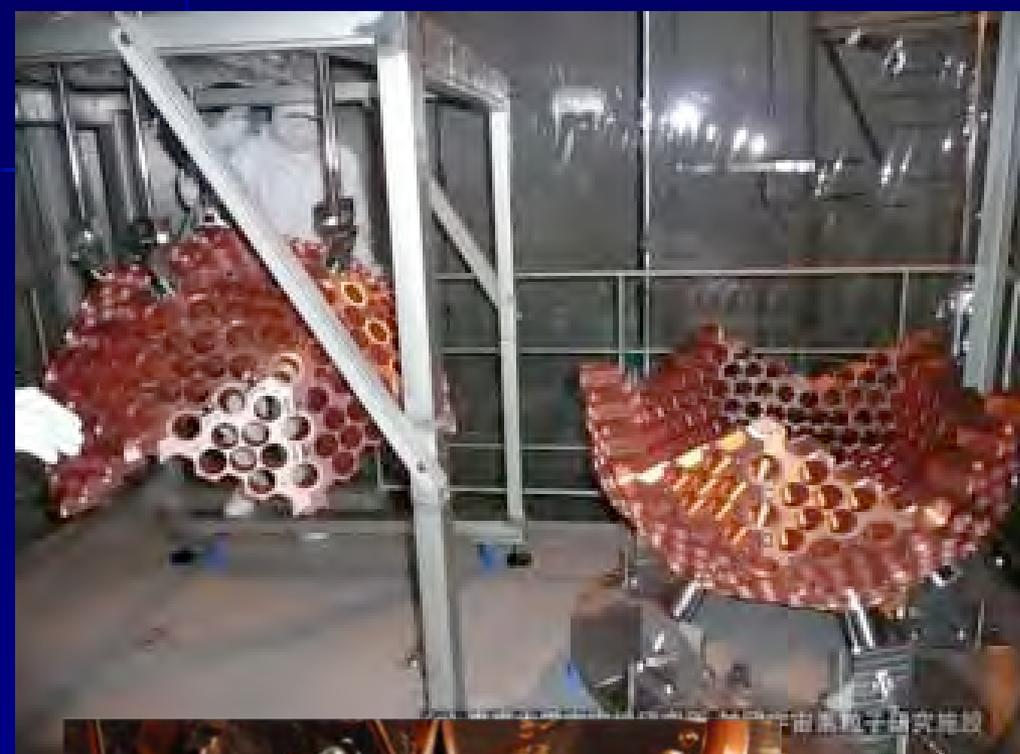
暗黒粒子X



原子核



発光



宇宙素粒子研究施設



(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

PMT Holder



- lower half



- upper and lower half





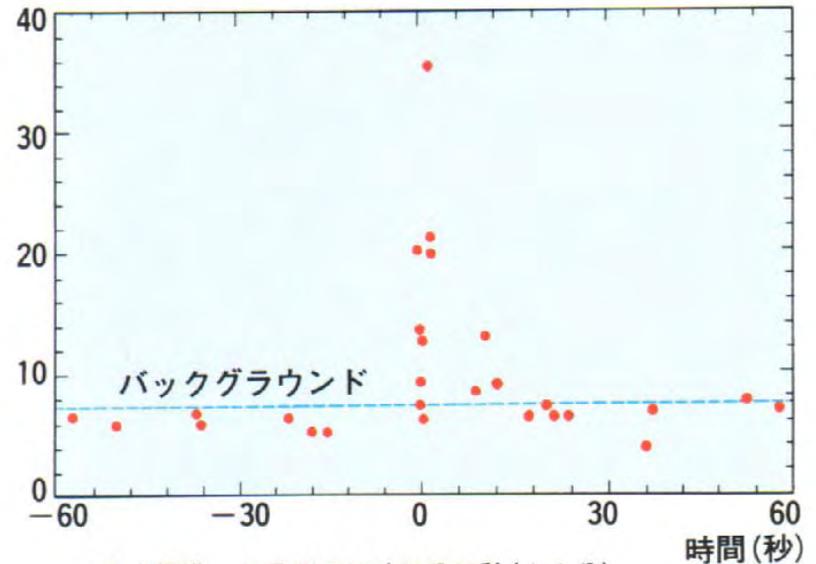
新しい宇宙望遠鏡

星の内部が覗ける。(星のX線写真)

超新星爆発

ニュートリノ
光より速く超新星爆発を検出。

KAMIOKANDE



日本標準 2月23日16時35分35秒(±1分)
グリニッジ標準時 2月23日7時35分35秒(±1分)

2002年ノーベル物理学賞



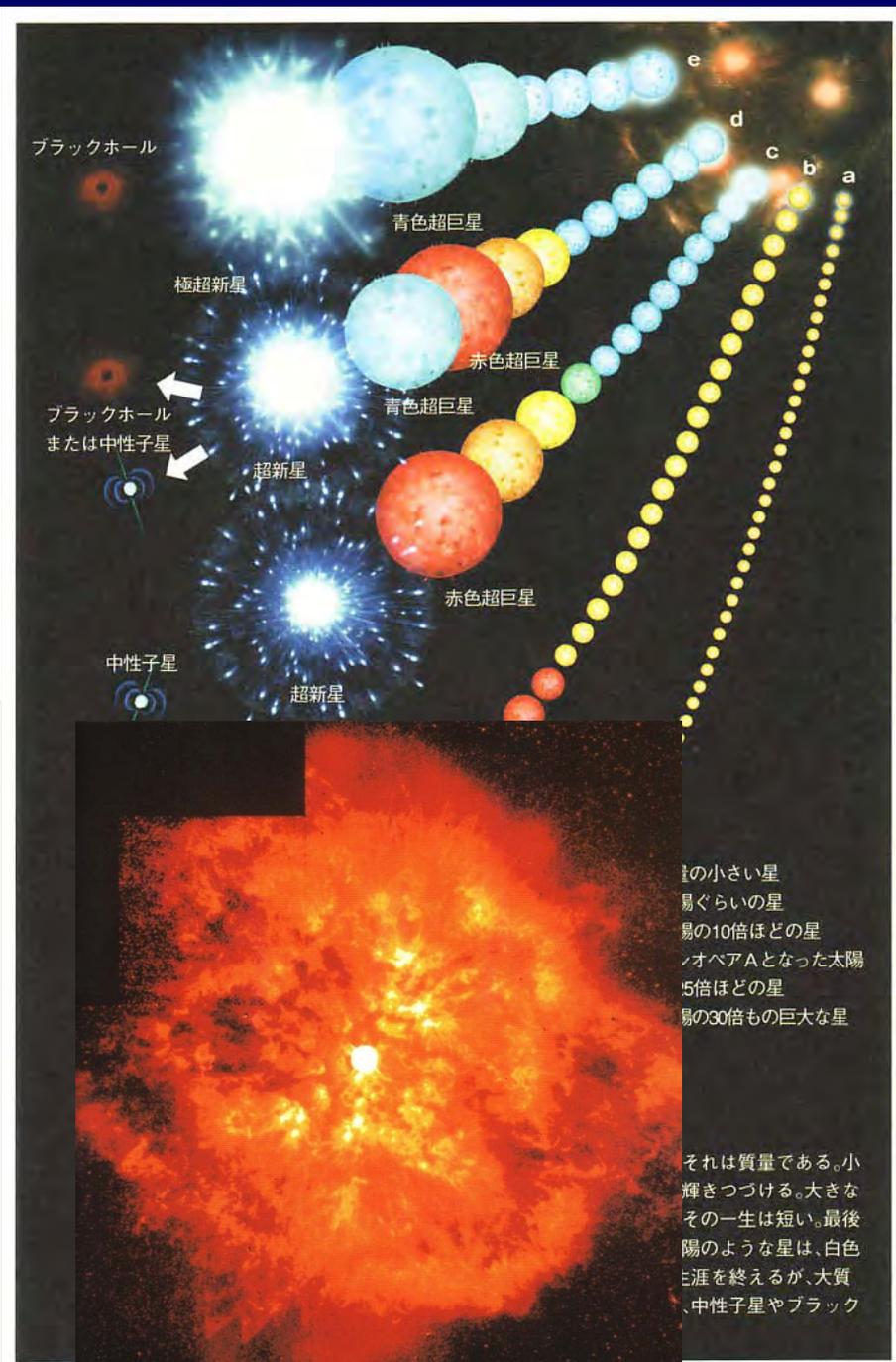
星の一生

■ 超新星爆発は星の最後の瞬間。

✗ 新しい星の誕生。

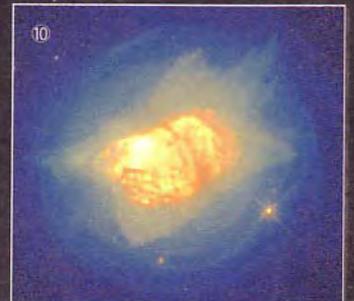
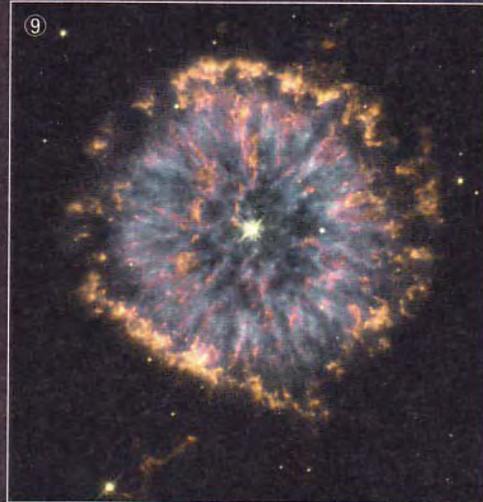
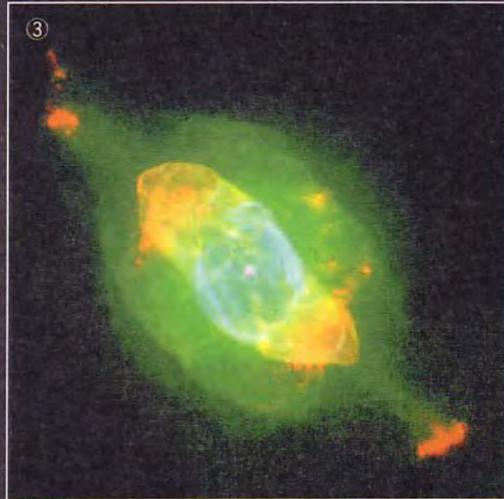
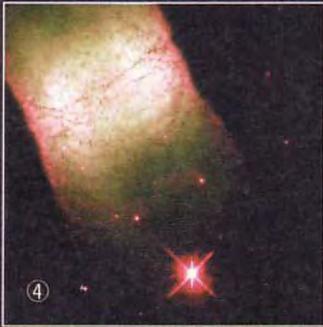
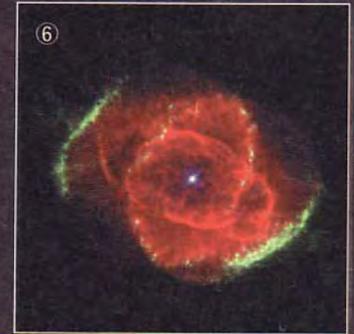
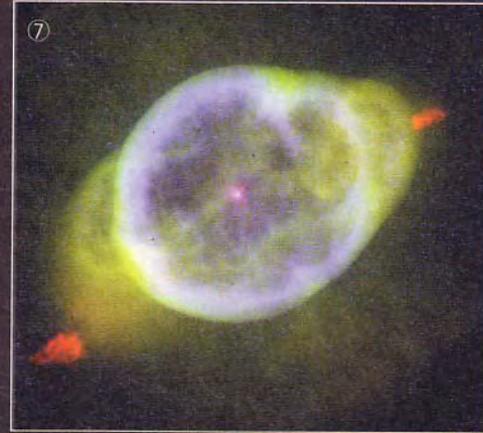
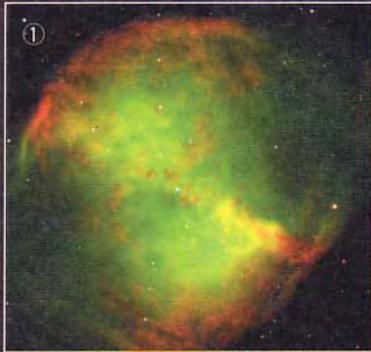
超新星爆発により、生成された元素が吹き飛ばされる。

また、超新星爆発の瞬間に原子核が超高密度状態になり、鉄よりも重い元素(例えば、金やウランまで)が作られると考えられている。



超新星のその後

ハッブル宇宙望遠鏡が見た惑星状星雲

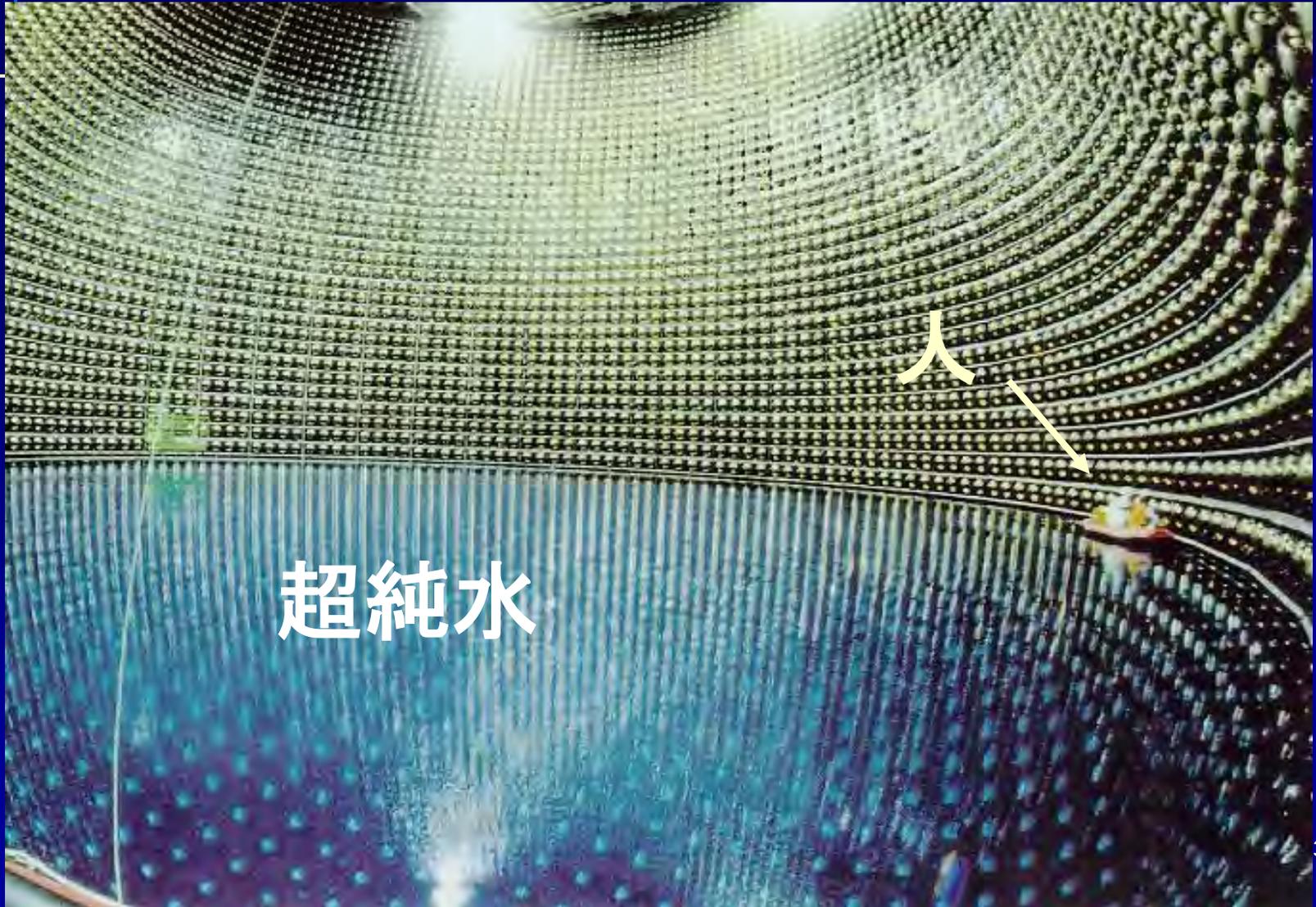


これらは、太陽程度の質量を持つ星の最後の姿

ニュートリノの役割

- 超新星の爆発を促す。
 - ニュートリノが超新星から大量の(99%)エネルギーを持ち出し、星が自分自身の重力で崩壊する。
 - ニュートリノの透過力がつよいことにより、宇宙(我々)は生まれてきた！

岐阜県飛騨市神岡町 スーパーカミオカンデ

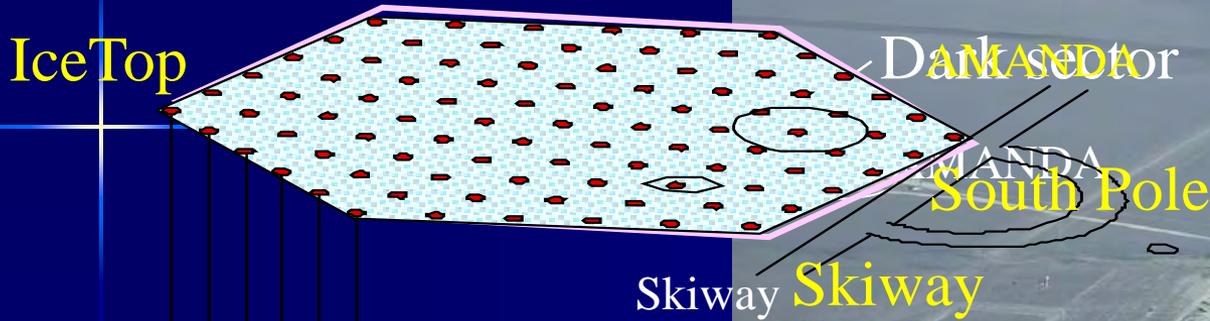


超純水

ニュートリノ

- 太陽の中が見える。
 - 核融合の証拠
- 地球の中が見える。
 - 地球の熱の源は放射線？
 - 地球反ニュートリノがKamLAND実験で観測される。
- 宇宙を見る。
 - ⇒ もっと大きなニュートリノ望遠鏡を！

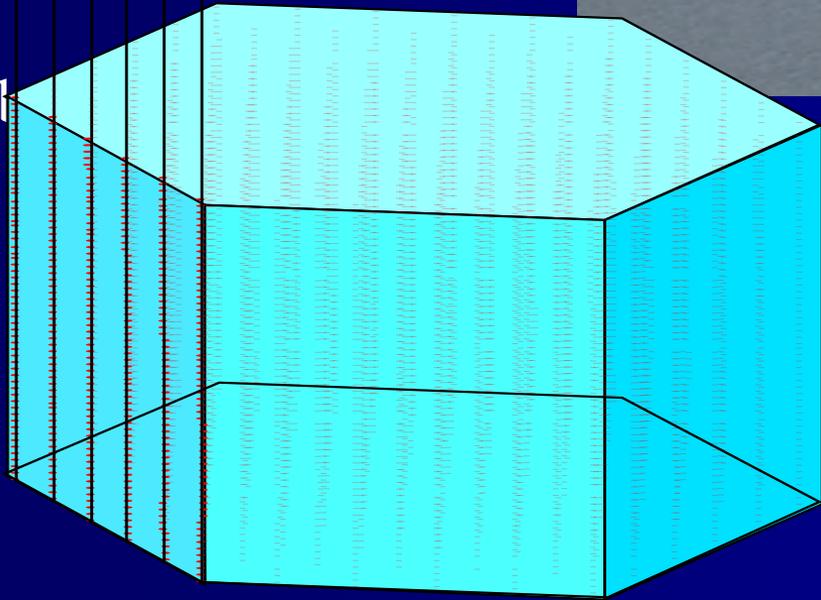
南極に巨大ニュートリノ望遠鏡が建設中。



1400 m

IceCul

2400 m



過去

- 素粒子の世界では、
 - 反粒子(反陽子、陽電子)が存在し、
 - 粒子・反粒子間に不平等が！

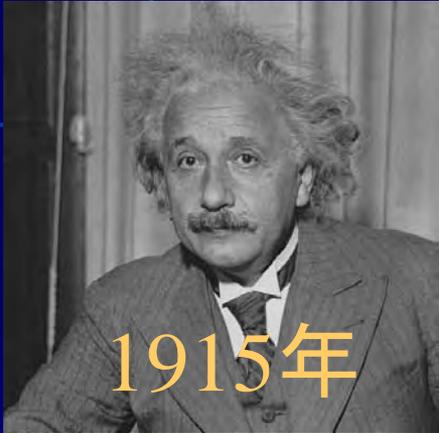
今の世の中では当たり前。だって、プラスの電荷を持った電子や、マイナスの電荷を持った陽子(原子核)なんてないもの。。。。

→ 宇宙の過去に何があったのか？

宇宙に始まりはあったか？

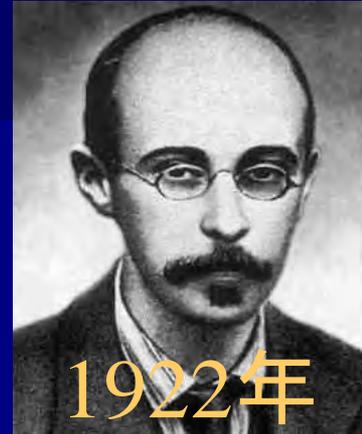
- 宇宙は膨張している。
 - ビッグバンの存在
- ビッグバンに迫る道具
 - ビッグバンは超高温（高エネルギー）の世界
 - ⇒ 高エネルギー加速器

宇宙の進化: (フリードマンの宇宙モデル)



1915年

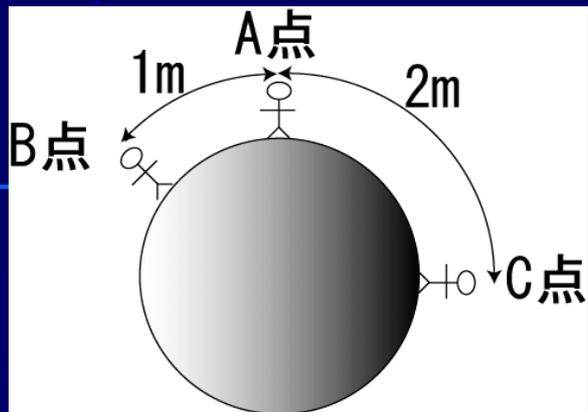
アインシュタイン:
一般相対性理論



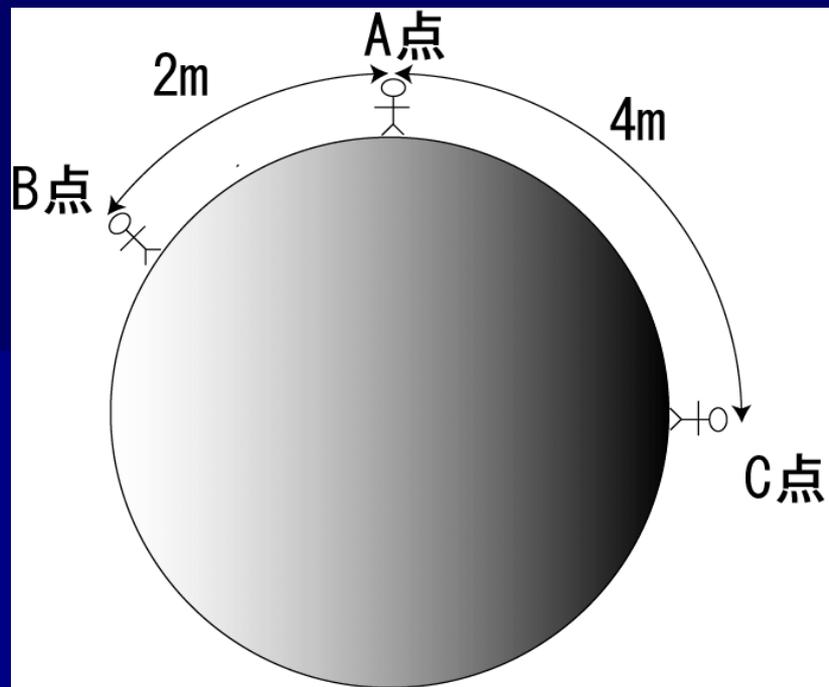
1922年

フリードマン:
膨張宇宙の解

- 重力によって、空間全体が伸び・縮みする
 - 力を及ぼし合っていないはずの二点の距離が伸びたり縮んだりする。
どの方向も、同じ割合で伸縮。



2倍に
膨張



A点からみれば、すべての点までの距離が2倍になる。
同じ時間の中にB点は1m遠ざかり、C点は2m遠ざかった



C点の遠ざかる速さは、B点の2倍

ハッブルの法則: $V=Hd$

この関係が観測できれば宇宙の膨張の証明!



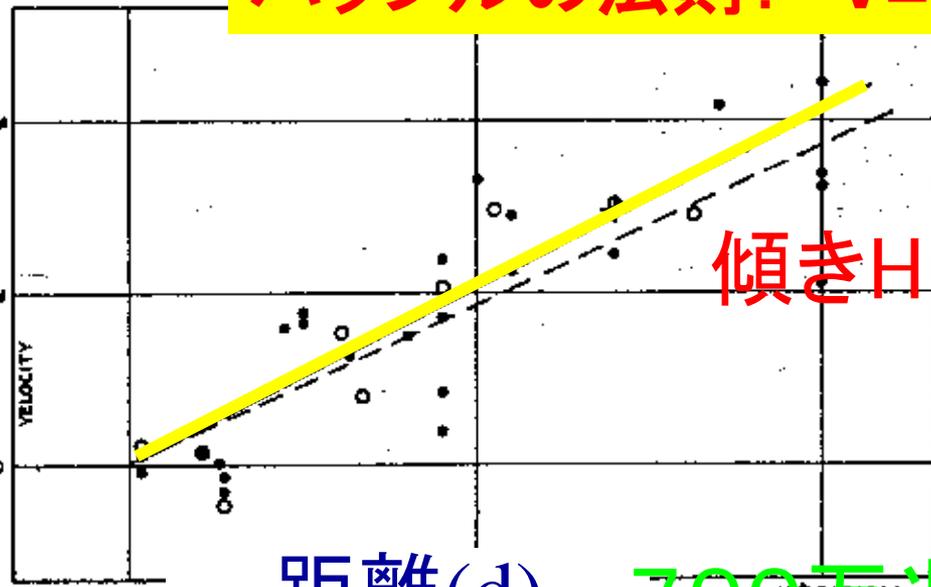
1929年, ハッブルが宇宙の膨張を発見!

遠方の銀河ほど早く遠ざかっていた

速度 \propto 距離 を示した!

ハッブルの法則: $V=Hd$

後退速度(V)

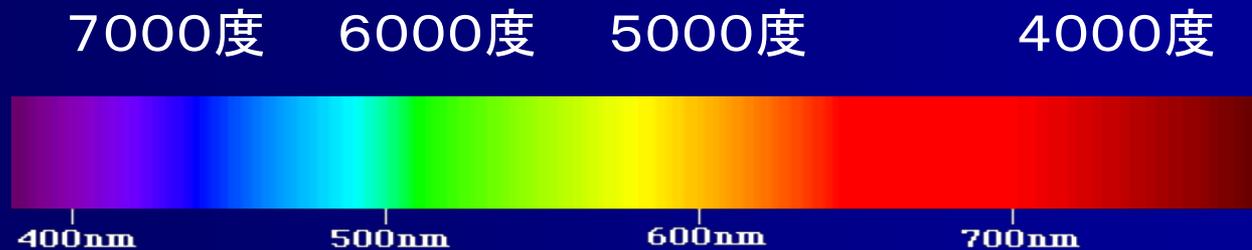


距離(d)

700万光年

宇宙の化石を探せ

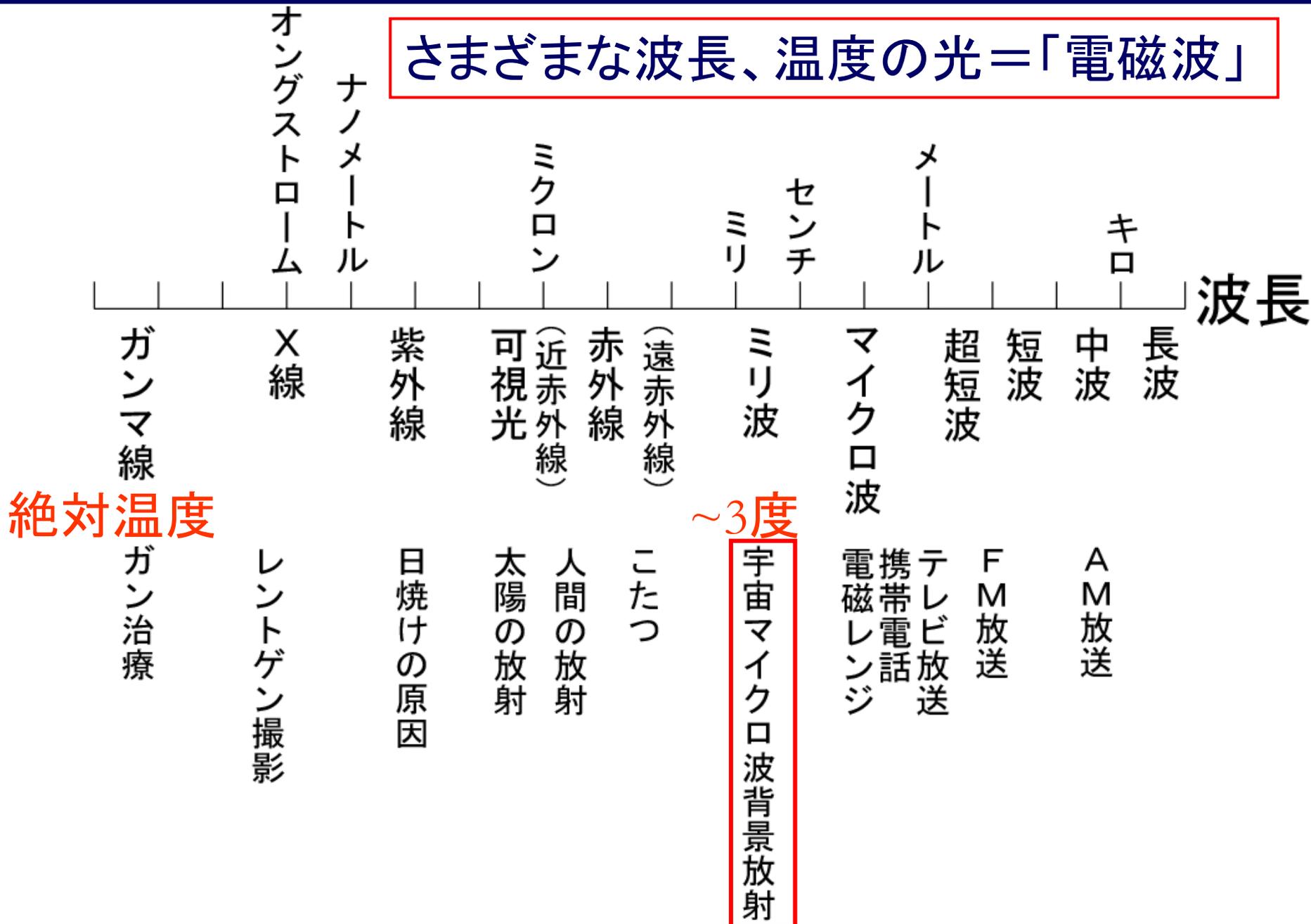
- 宇宙は昔高温だった。熱かった宇宙にあった光は今どうなっているか？



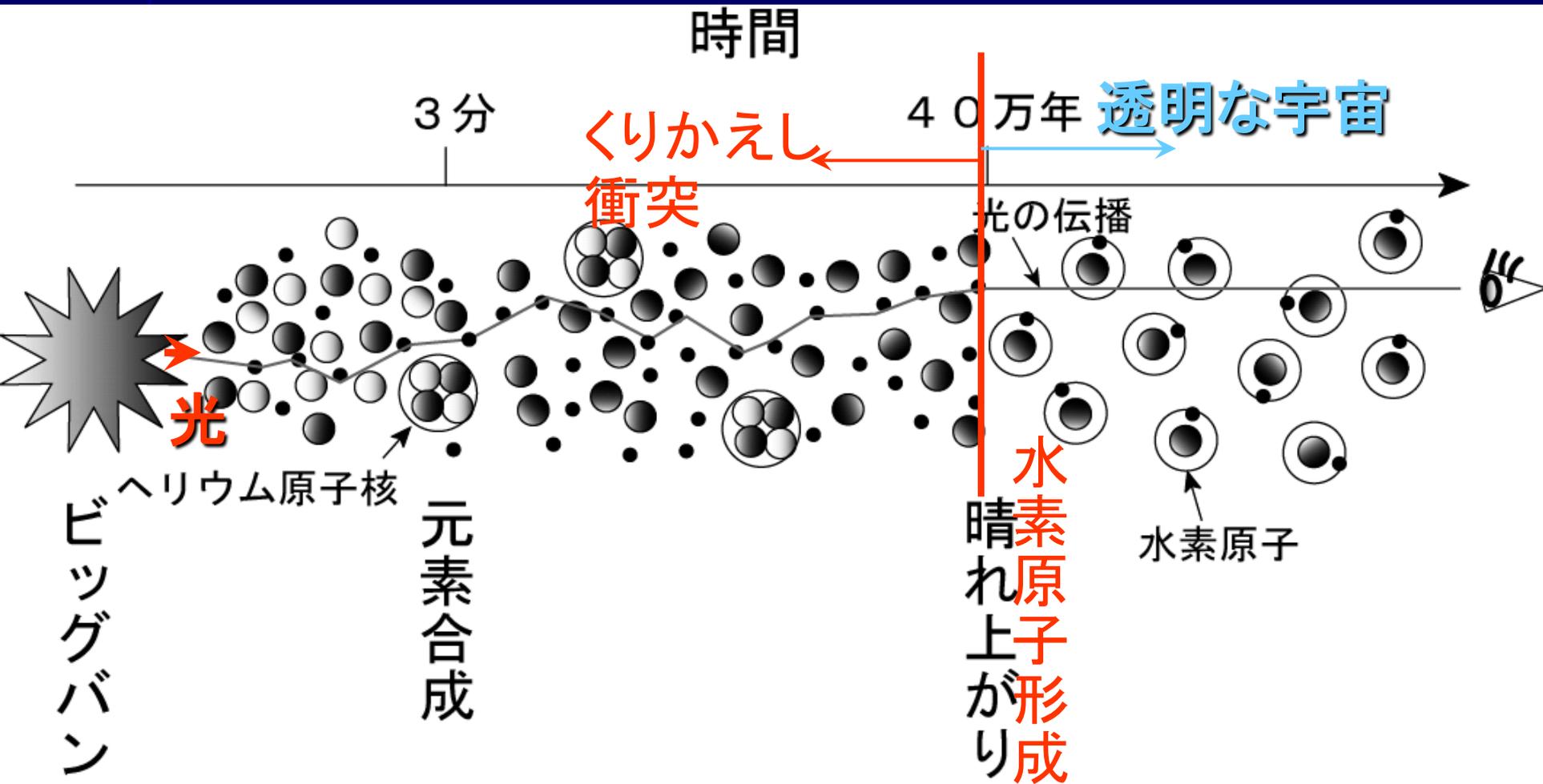
宇宙の膨張と温度

現在の宇宙は絶対温度から測って 3°C の光で満たされている？

さまざまな波長、温度の光＝「電磁波」



宇宙マイクロ波は何時の時代の光？



温度

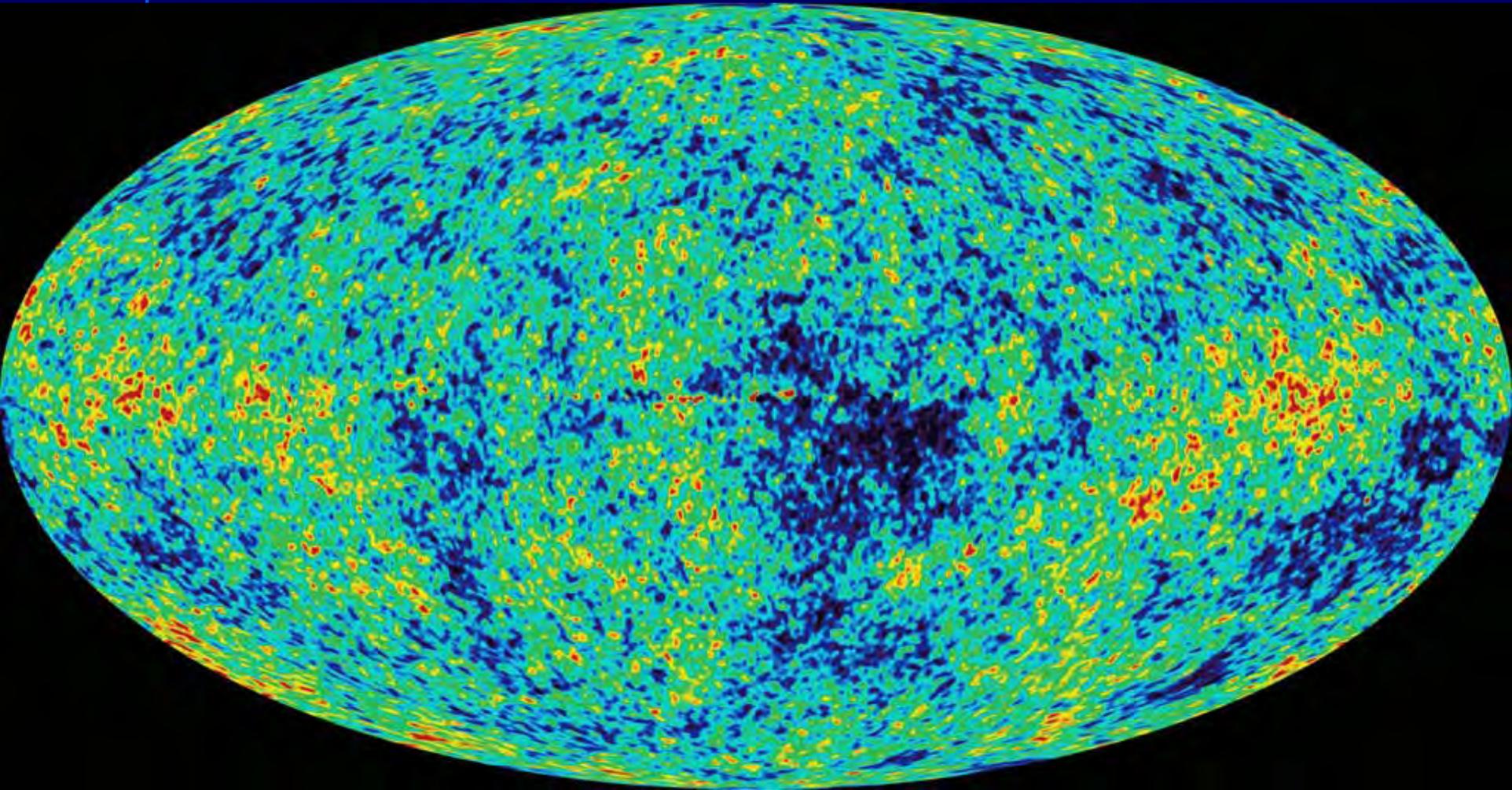
10億K

3000K

2.725K

宇宙は膨張: 低温に

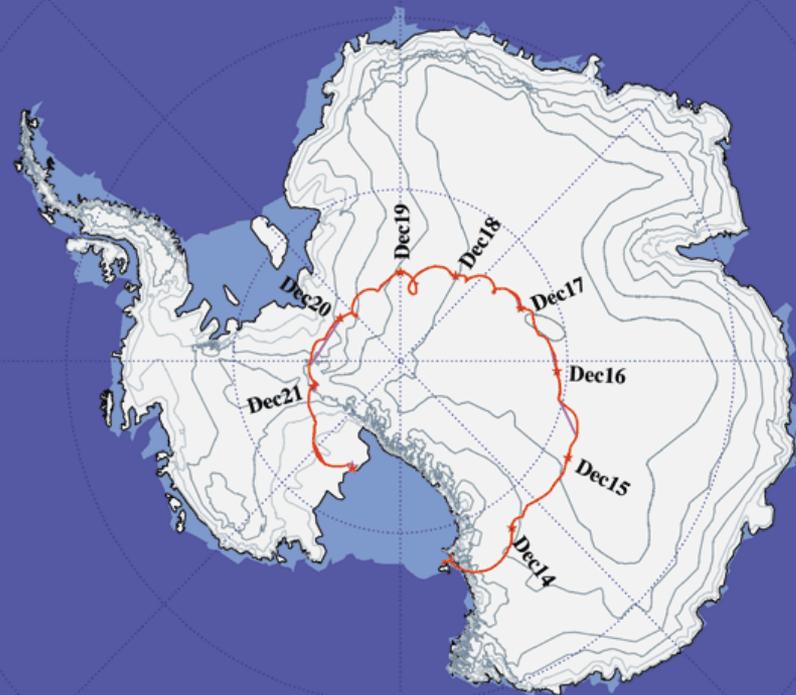
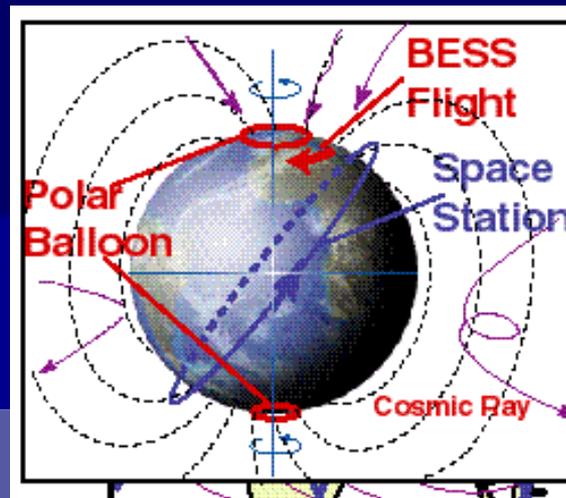
COBEによる最新の観測温度ゆらぎ



WMAPが明らかにした最新の宇宙像

- 宇宙の年齢は**137億歳**
- 宇宙の全エネルギーの23%は正体不明「**暗黒物質**」
 - 宇宙の全エネルギーの4%が水素やヘリウムなどのおなじみの物質。しかし、星やガスとして実際に観測されているのはそのうちの2、3割程度。
 - **ニュートリノも1%くらい。**
- 宇宙の全エネルギーの73%は正体不明「**暗黒エネルギー**」

宇宙からの反粒子の探索。



He/He Limit

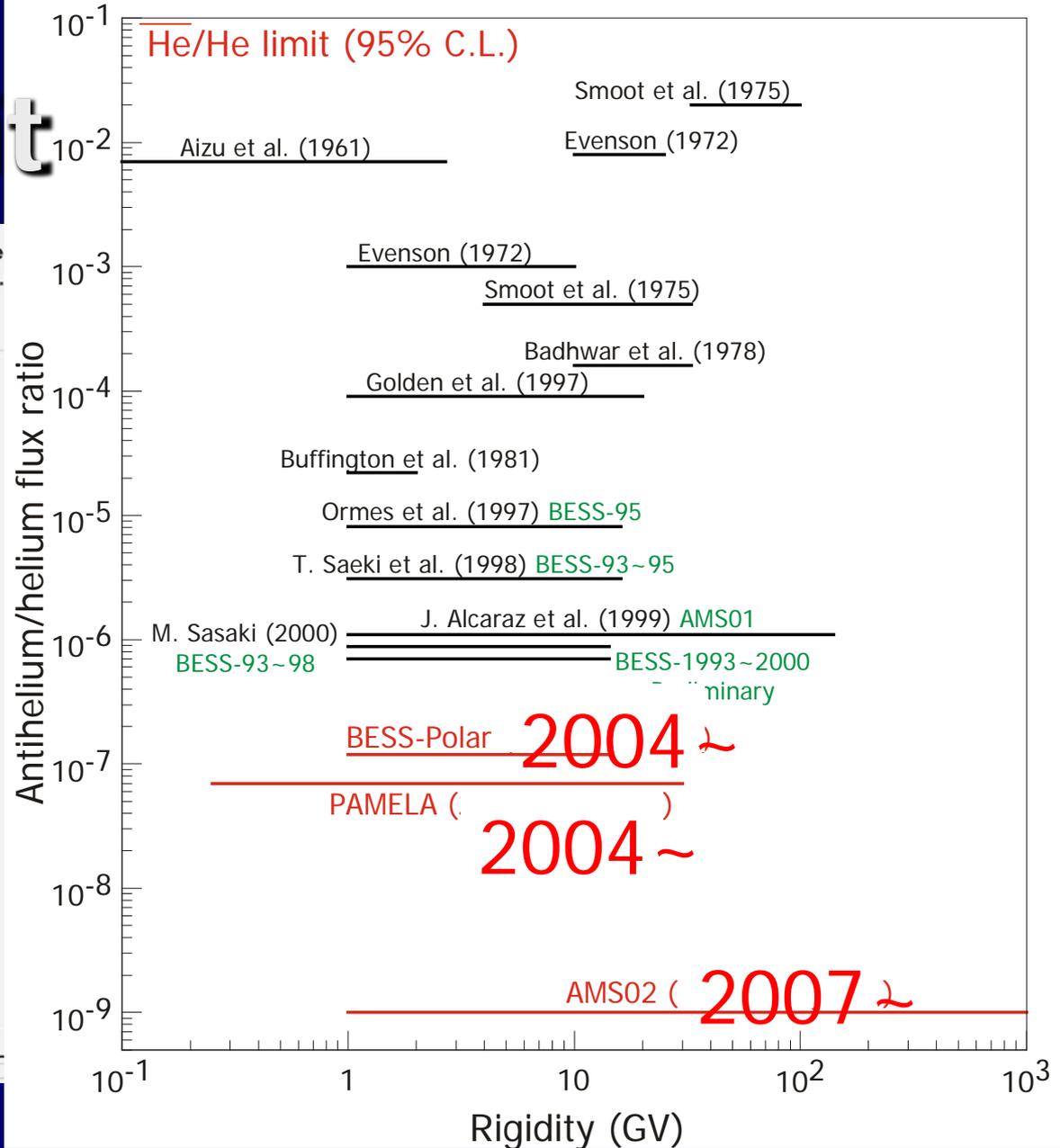
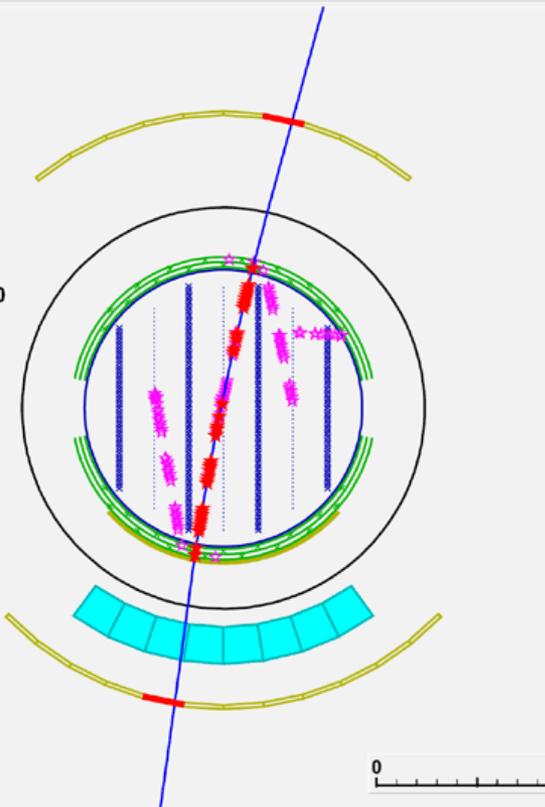
BESS-Polar

ONLINE : fadclnx.bess-net.ke

Event Time: 17.25.33.

Event: 1398034 (06) Size: 2234 FADC: 1472 FEND: 730
Trigger: 000111111 JET: 33 IDC: 3 UTOF: 1 MTOF: 1 LTOF: 1

Nhit: 33/3/37
Nshd: 48
 χ^2 : 4.48/36.70
RGT: 1.89 GV
 $\sigma_{1/R}$: 4.65 TV⁻¹
1/ β : 1.003



反物質が無い。

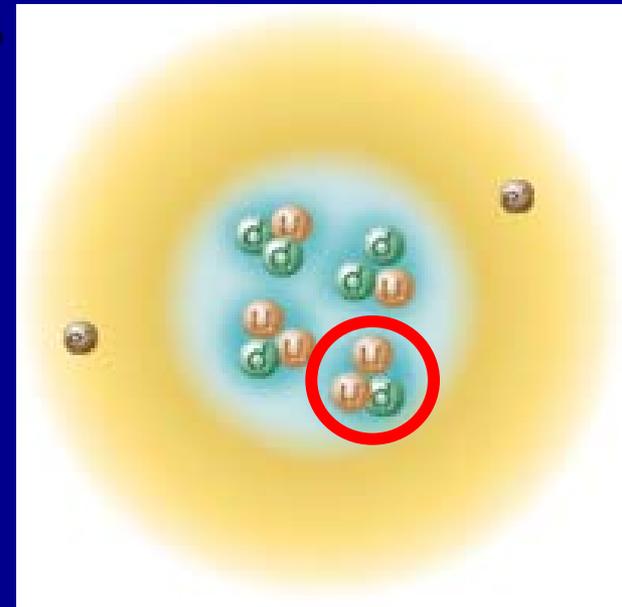
PAMELA: 陽電子異常を観測→^{4c}調査中

未来

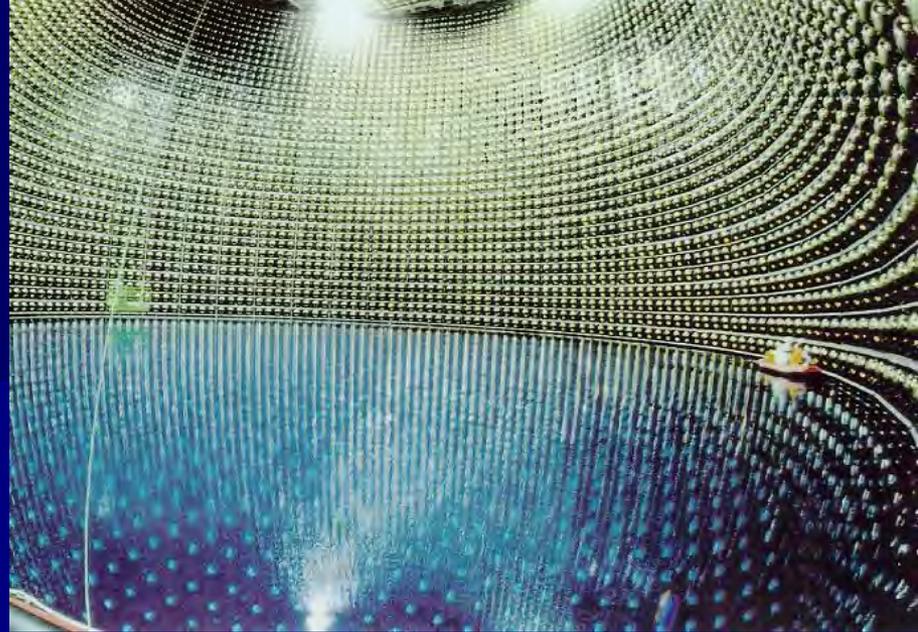
物質は安定か？

- 物質の最小構成単位はクォークとレプトン。
 - 電子より軽い、電荷を持った粒子はない。よって電子は安定(壊れない)。
 - **陽子**は大丈夫？
 - 力(電磁力・弱い力・強い力)の統一理論は陽子は壊れる(安定でない)と预言する。

我々はどうなるの？



スーパーカミオカンデは 陽子の崩壊を探索中



■ 5万トンの水

$$5 \times 10^7 \text{ グラム} \times (6 \times 10^{23}) \times 10 \text{ (H}_2\text{O)} \\ = 3 \times 10^{32} \text{ 個の陽子}$$

1個の陽子の平均寿命は 10^{33} 年以上(3年観測)
宇宙は安泰？(宇宙の年齢はわずか 10^{10} 年)

宇宙の加速膨張

■ 宇宙は永遠に膨張するの？

– 闇黒エネルギーのために加速膨張している。。。

■ 1000億年後には宇宙の大きさは現在の500倍に。

– 暗くて星が見えない。。。

■ 1兆年後には宇宙の大きさは現在の1000000倍に。

■ 1000000年後には、ブラックホールも蒸発

冷たい宇宙が永遠に続く？

まだよくわかりません。

– 加速が過ぎて、空間が引き裂かれる？

– 闇黒エネルギーが熱に変わり加速膨張が終わる？

そもそも「闇黒エネルギー」って本当？

地球上に存在するわずか～1m、寿命約100年の人間が

- 100000000000000000000000000000000m

- 0.0000000000000000000000001m

の世界を知り、

- 宇宙誕生の瞬間(過去)

- 元素合成:ヘリウム、重水素等の形成、宇宙誕生後3分

- 反粒子の消滅:宇宙誕生後4秒

- インフレーション: 10^{-35} 秒

- (まだよく分からない: 10^{-43} 秒 時間・空間の次元は11次元?
超弦理論)

- 未来

- 物質(陽子)は 10^{34} 年まで安定

- 宇宙は加速膨張している。

を知ることができる。

⇒ ほとんど奇跡みたいなことですね。