

2012.7.19
ヒッグス粒子発見記念講演会

残る謎： ダークな世界

1. ヒッグス粒子の作る宇宙
2. 暗黒世界から作られた宇宙

数物科学系
末松大二郎

1. ヒッグス粒子の作る宇宙

**ヒッグス粒子は、素粒子に質量を与え、
宇宙が構造を持つきっかけを与えた。
しかし、ヒッグス粒子をもとに作られる
宇宙は我々の知る宇宙とは全く違った
宇宙になってしまう！
何か足りない！！**

素粒子の標準模型


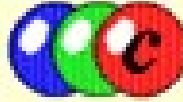










現在、正しいと考えられている素粒子の世界を記述する模型

「標準模型」を構成する粒子群

物質粒子

相互作用の媒介粒子

質量の起源

	第一世代	第二世代	第三世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	電子  ニュートリノ	ミュー  ニュートリノ	タウ  ニュートリノ
	 電子	 ミュー	 タウ

強い相互作用  グルーオン
電磁相互作用  光子
弱い相互作用  Wボソン
 Zボソン



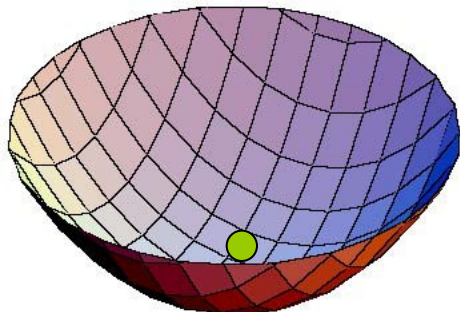
ヒッグス

(LHCで探索中)

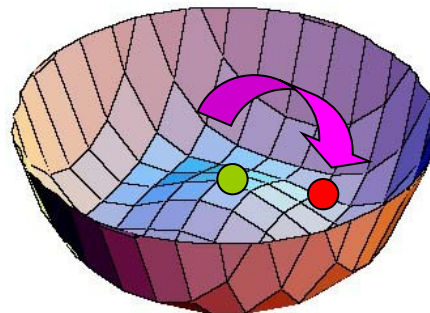
粒子とは逆符号の電荷を持つ相棒が存在 ⇒ 反粒子

ヒッグス粒子と素粒子の質量

ヒッグス粒子は真空（エネルギー最低状態）の性質を決める

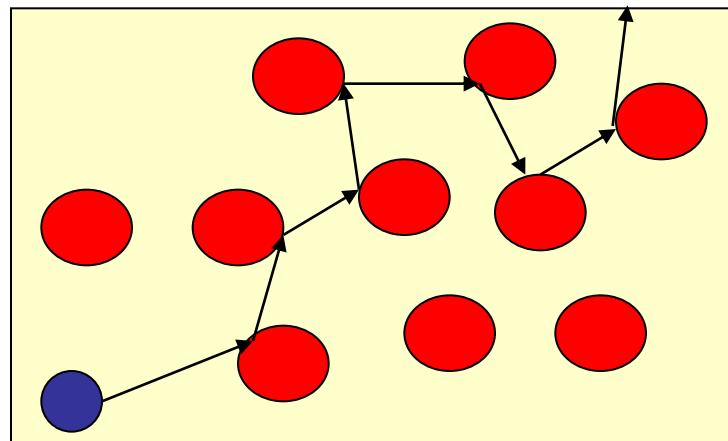
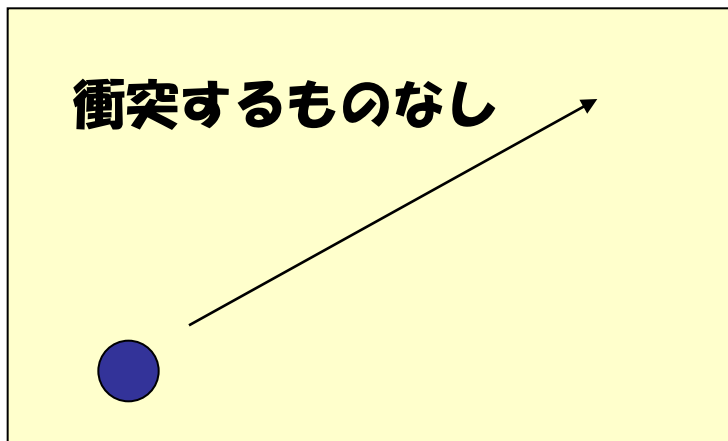


- 対称性が破れる前の真空状態



- 対称性が自発的に破れた後の真空状態

ヒッグス粒子が詰まった状態



ヒッグス粒子とどのくらい強く衝突しやすいかで質量の大きさが決まる⁴

自然界の構造

“大きさで見る”

質量

強い力

$\sim 10^8$ cm

素粒子

原子核

原子・分子

$< 10^{14}$ cm

$\sim 10^{13}$ cm

電磁気力

多様な物質

宇宙

重力

$\sim 10^{28}$ cm

銀河・銀河団

星

$10^5 \sim 10^4$ cm

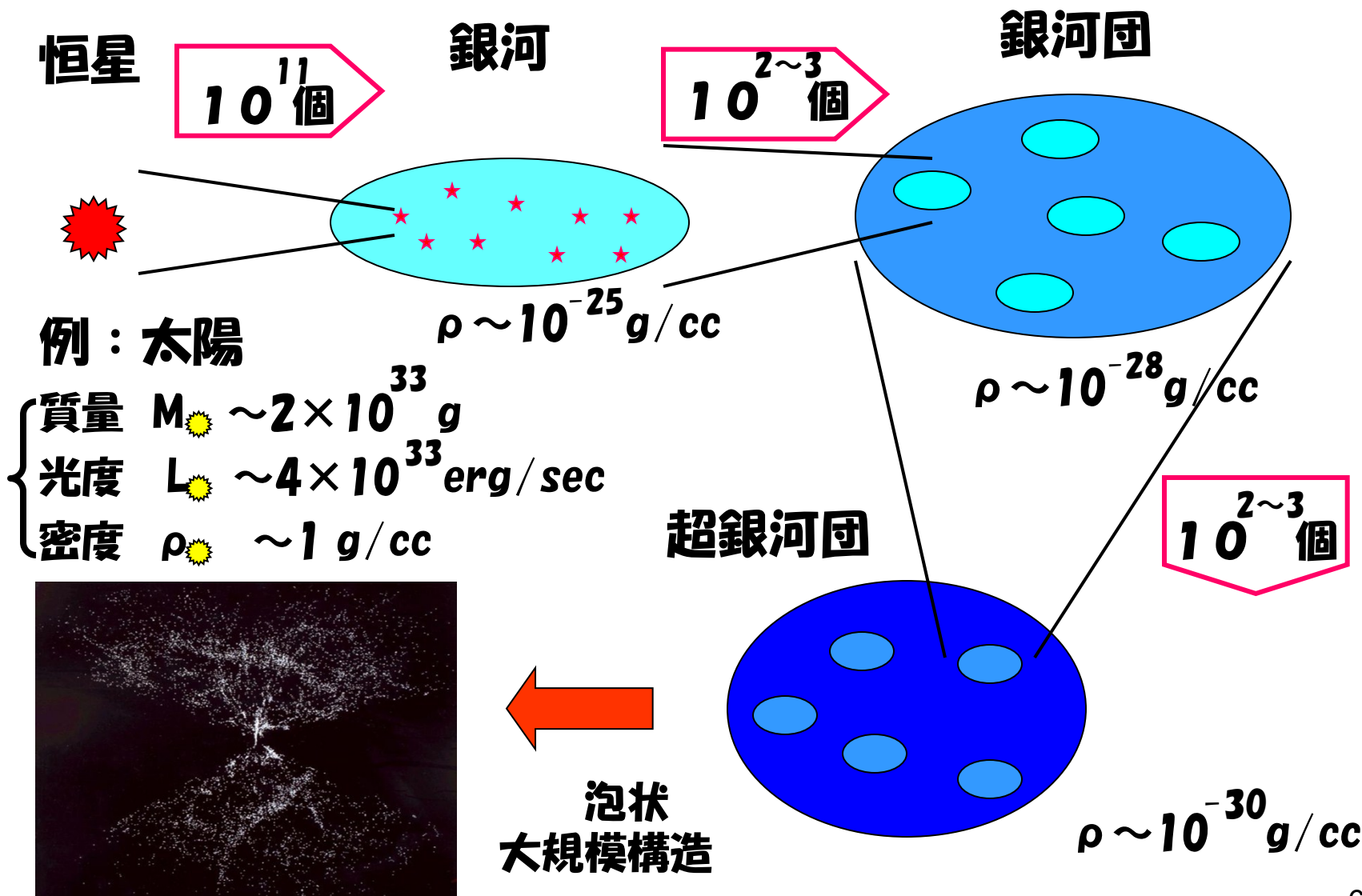
$10^{22} \sim 10^{25}$ cm

$10^6 \sim 10^4$ cm

各階層の構造は異なる力で形成された

宇宙の階層構造

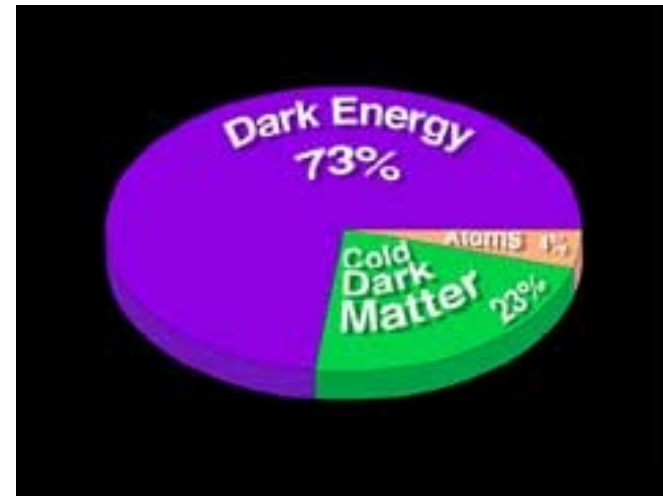
標準模型により説明？ NO！



ヒッグスは素粒子の**質量の起源**を与え、宇宙が現在の姿になる原因を作ったといわれる。

しかし、宇宙観測の結果は、現在の宇宙の姿をヒッグス粒子の存在では説明できないことを示している！

宇宙のエネルギー全体に占める標準模型がもたらす寄与は全体のわずか**4%**に過ぎない



これが、次の段階の大きな研究対象となる**暗黒世界**である。いったい、**これは何なのか？**

2. 暗黒世界から 作られた宇宙

暗黒世界(ダークワールド)

暗黒物質(ダークマター) 23%

暗黒エネルギー(ダークエネルギー) 73%

暗黒世界の存在は、宇宙観測の中で明らかに
なり、素粒子物理の研究対象ともなってきた

宇宙の観測 ⇒ 望遠鏡 (天体の放出する光を検出)

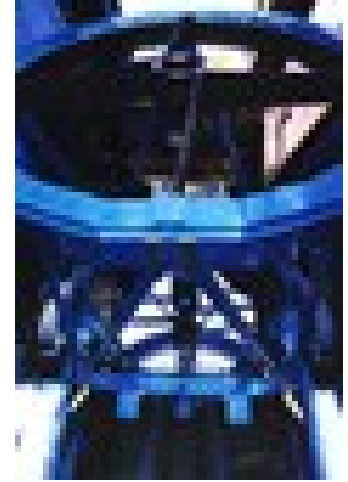
地上望遠鏡



SDSS



2dF

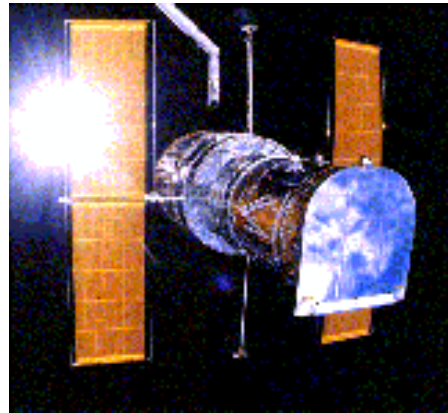


すばる

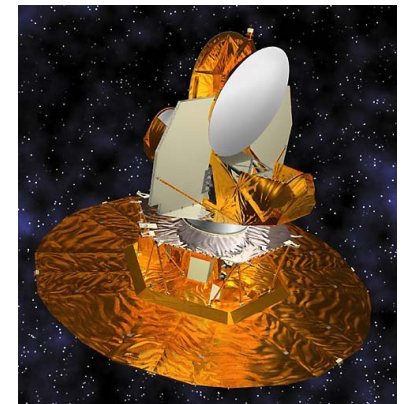
人工衛星望遠鏡



COBE



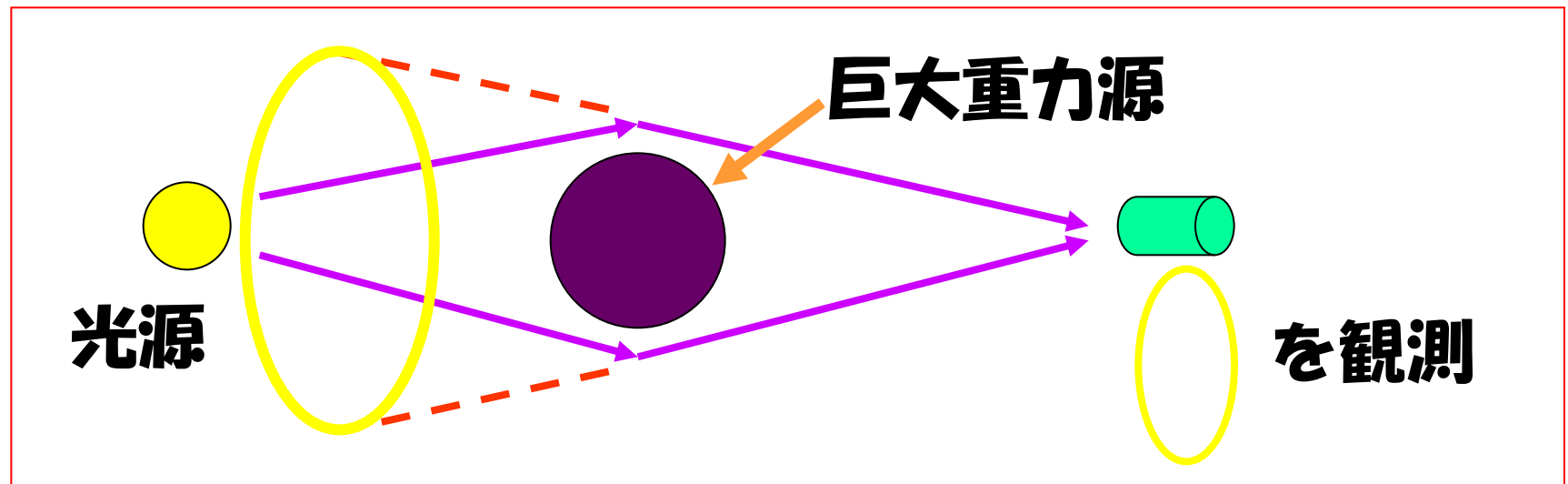
WMAP



暗黒物質の存在

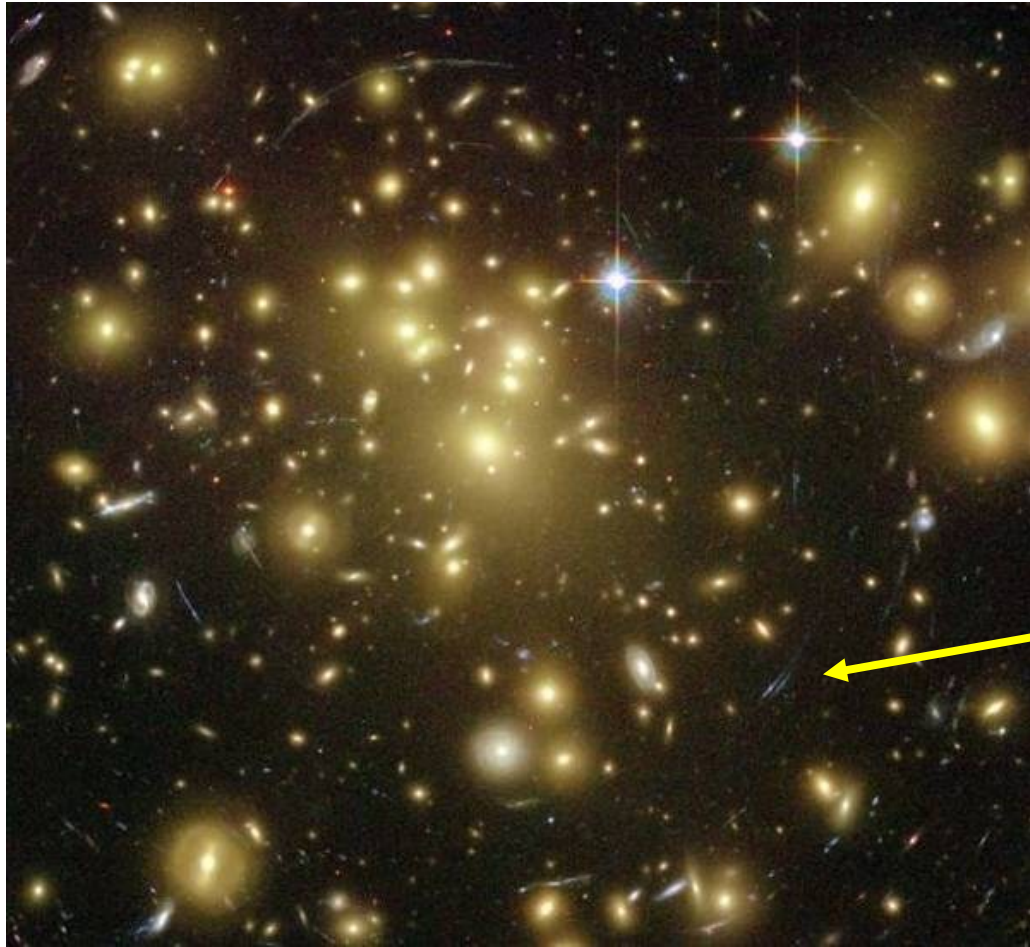
重力レンズ効果

重力により光の経路が曲げられ、光源の無い場所が光って見えたり、光源が歪んで見える。



光らない重力源の強力な存在確認手段となる

アベル銀河団1689で観測された重力レンズ効果



青い弧が背景銀河の
重力レンズ効果に
よる像

黄色輝く銀河の生み出す重力はこの像を生み出す
のに**必要な重力の1%**に過ぎない

暗黒物質の直接的(?)観測 (2006年NASA発表)

2つの銀河団の衝突後の物質の飛散の様子を観測 (弾丸銀河団)

→ 光を発する物質の存在量と予想される重力の大きさを比較



赤い部分：
通常物質

青い部分：
暗黒物質

暗黒物質は
重力相互作用し
ないため、通常
の物質より速く
飛散

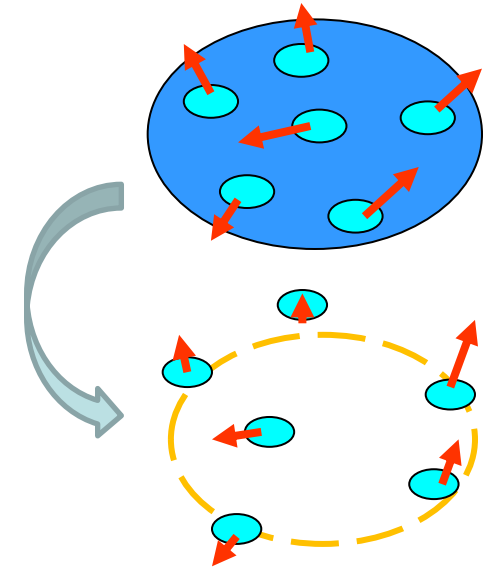
暗黒物質存在探索の歴史



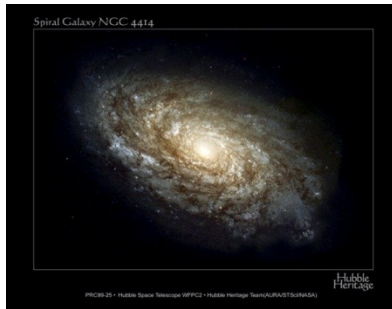
① ツビッキーの指摘 (1933年)

かみのけ座銀河団

「銀河の速さは大き過ぎて光って見える物質の重力では銀河団として安定に存在し得ない。」

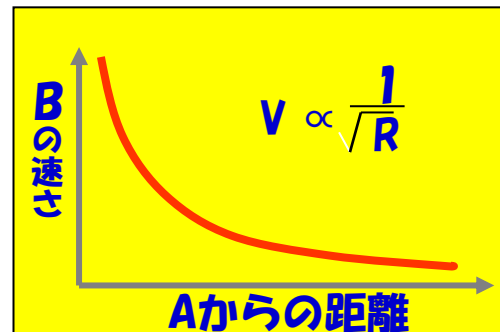
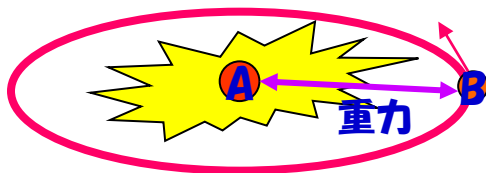


② ルービンの発見 (銀河の回転曲線の謎) 1970年代

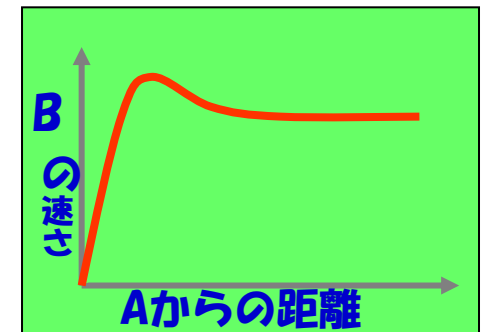


渦巻き銀河の周辺部の星の速さ

→ なぜ、一定のはやさなのか？



光って見える物質からの予想
(Aに質量集中)



観測結果

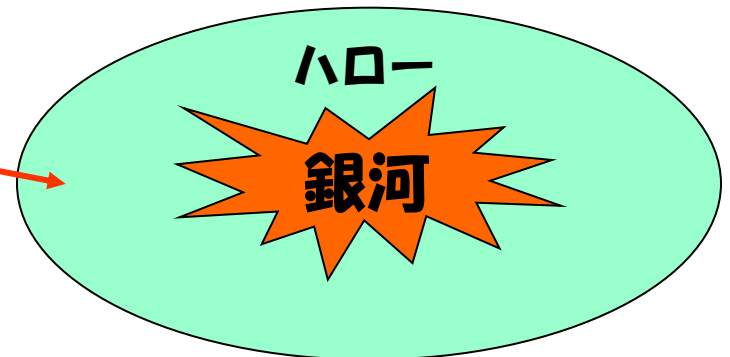
光らない質量の存在を仮定する

これを暗黒物質
(ダークマター) と呼ぶ

観測で見つかった様々な謎がうまく説明できる！

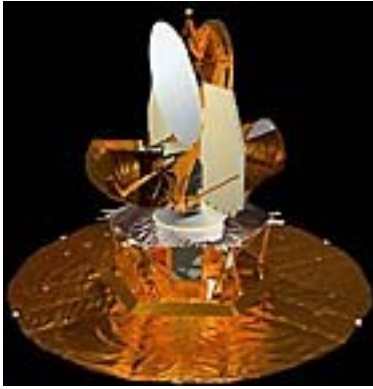
その存在形態は？

銀河を浸し取り巻く
ハローとして存在する
↓ 3cm^3 中
水素原子1個分の質量



暗黒世界の定量的解明

① 宇宙背景放射の観測(WMAP)

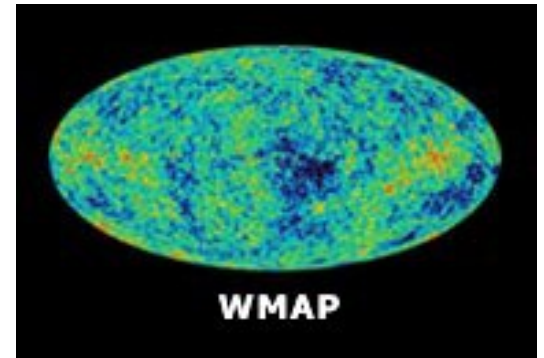
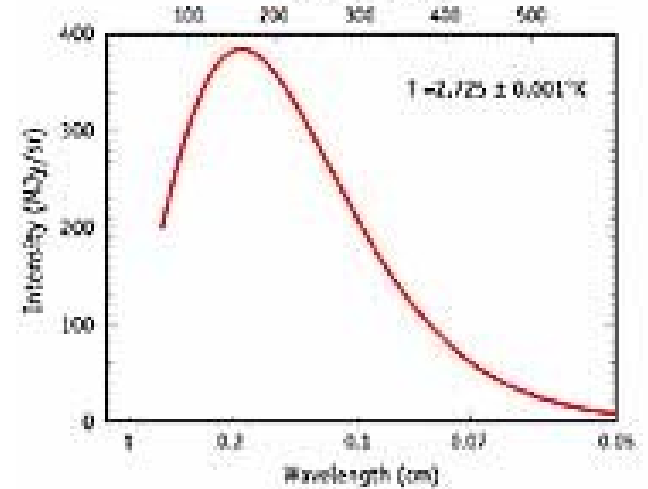


人工衛星搭載の
望遠鏡を使用



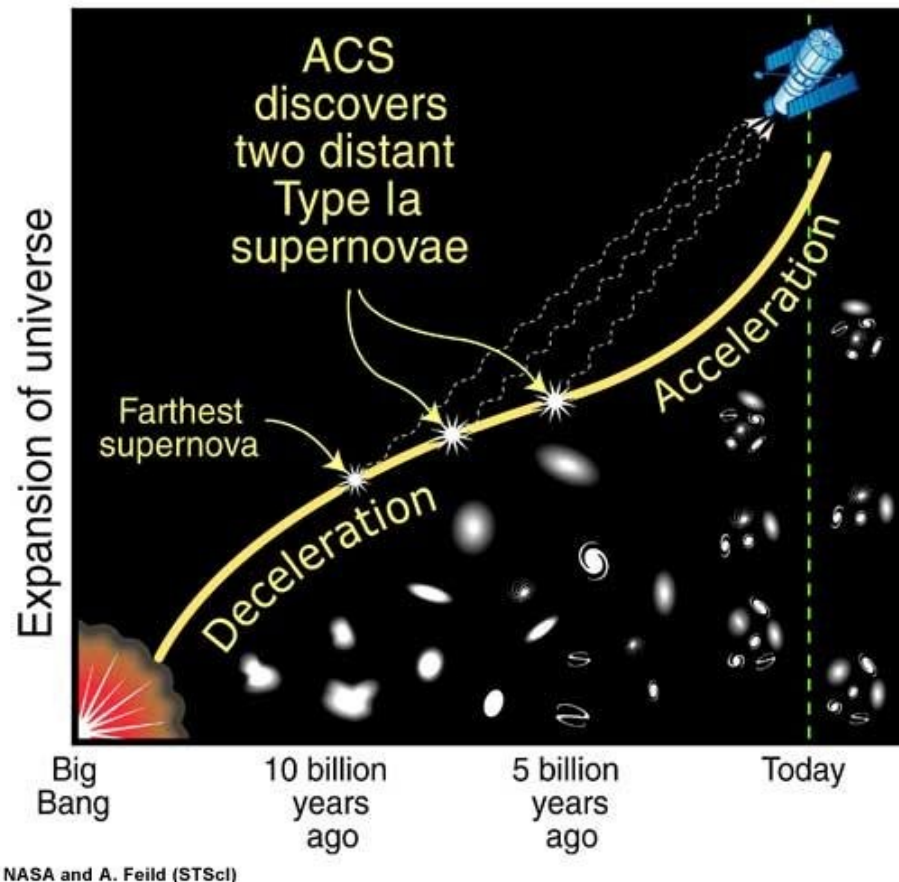
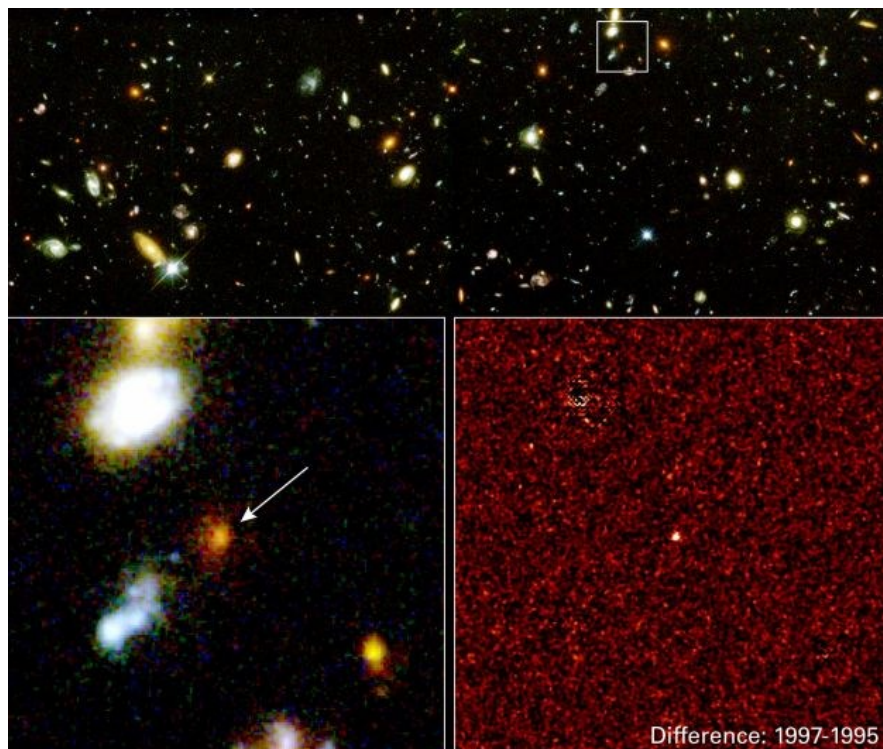
宇宙背景放射の
揺らぎの構造の
詳細な観測

SPECTRUM OF THE COSMIC
MICROWAVE BACKGROUND



暗黒世界について精度の高い定量的なデータが得られるようになった

② 遠方の超新星の観測



la型超新星
星進化の最終段階で起こる爆発現象

現在の宇宙が**加速膨張**していることを示す

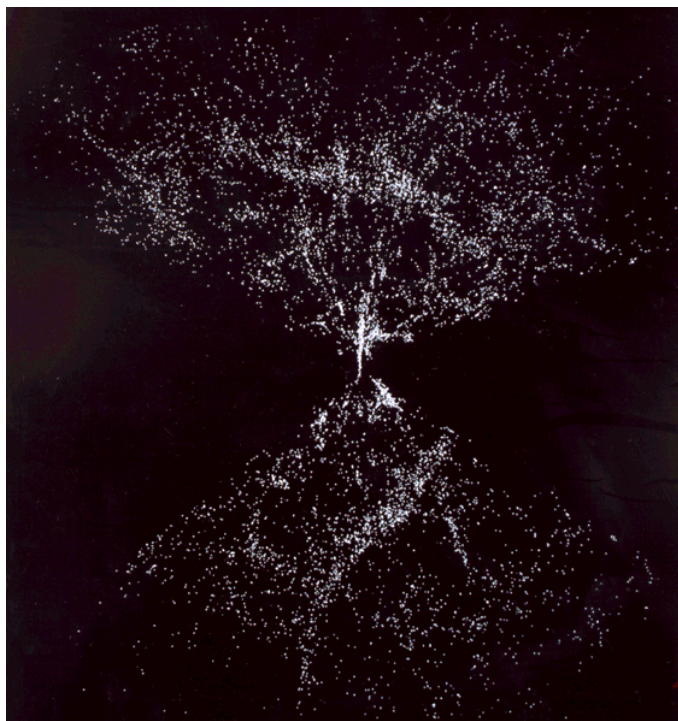
③ 銀河分布の探索

$\Omega_{DM} + \Omega_B$ に関する情報

銀河形成の種

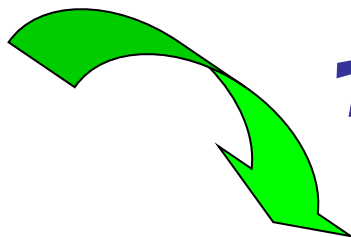
2dF、SDSSによる全天の銀河分布の探索

1986年ゲラー等

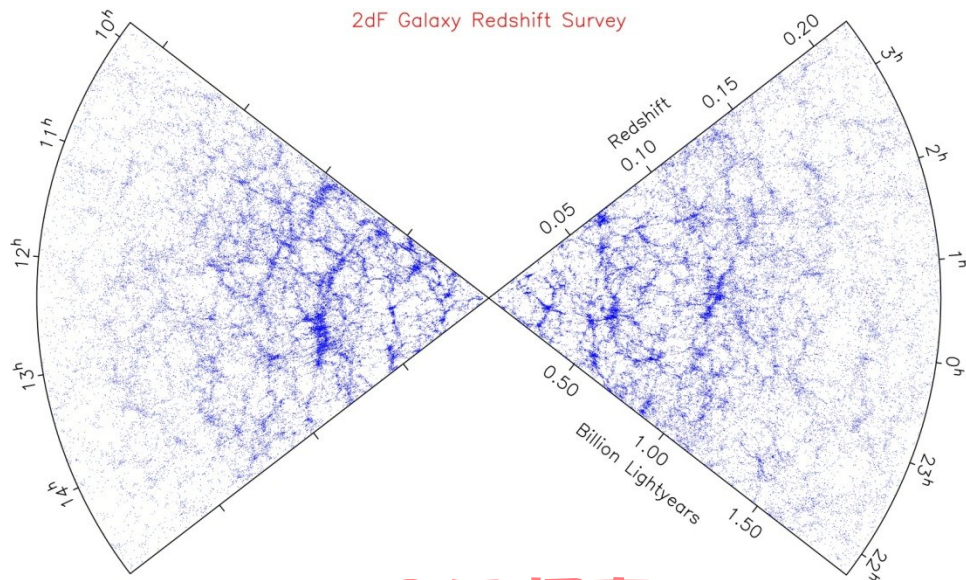


CfA 探索

(宇宙の果てまでの**2%**の領域)



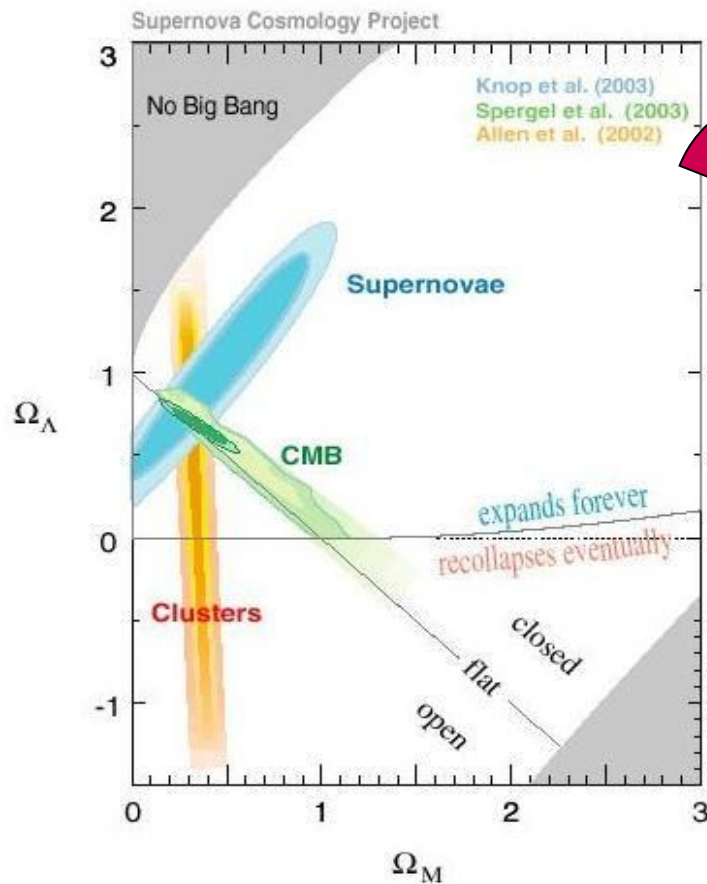
7倍の領域へ拡大



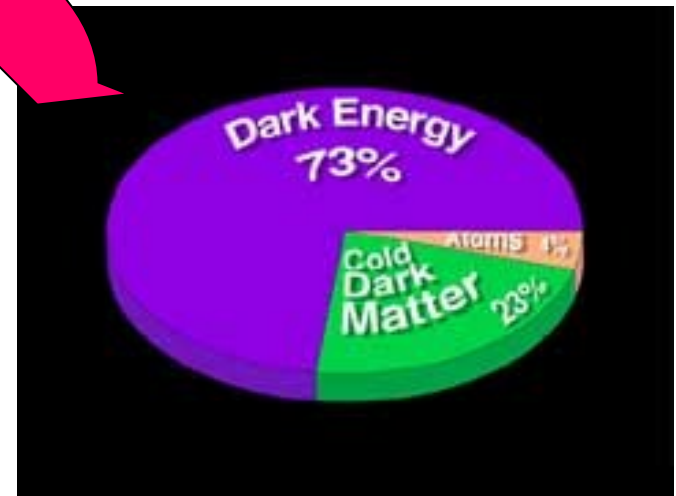
2dF 探索

(宇宙の果てまでの**15%**の領域)¹⁷

これらの観測結果を説明するには**光らない質量を持つ物質**と**特別な性質を持つエネルギー**が存在し、**これらが宇宙の全エネルギーの大部分を占めると考えることが必要となる。**



宇宙を満たすエネルギーの
形態と割合



通常**の物質**は全エネルギーの
4%に過ぎない

暗黒物質(DM)の正体は??

暗黒物質に要求される性質

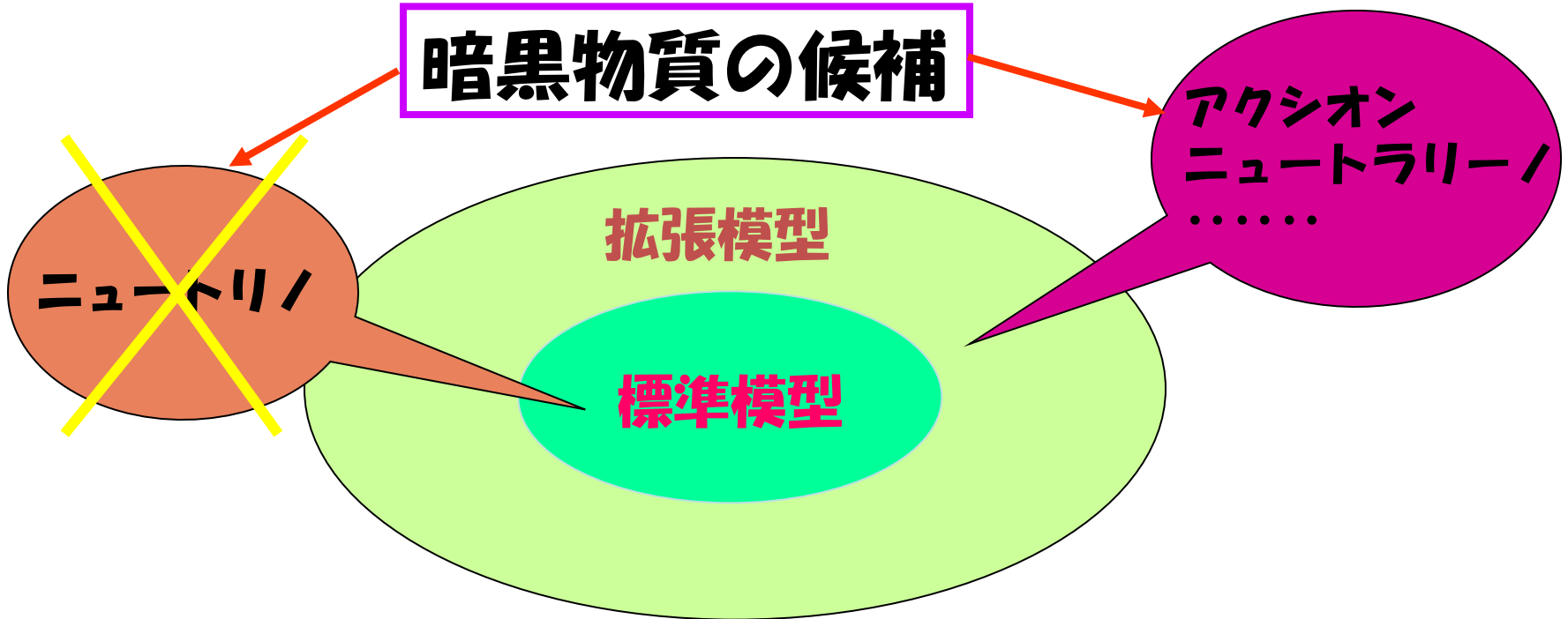
- ① 光らない (電磁氣的力が作用しない)
- ② 適度な質量を持つ (重力が作用する)
- ③ **安定**に多量に存在 (全エネルギーの23%)

➤ 弱い相互作用程度の強さで相互作用をする質量を持つ粒子 (**WIMP**と呼ばれる) の宇宙膨張過程での**残存粒子**として説明可能

➤ ヒッグス粒子に質量起源を持つ素粒子としては説明が難しい ⇒ **新たな質量起源**

暗黒物質は素粒子標準模型の拡張を示唆！

暗黒物質の候補



- 新たな質量の起源の存在
- **暗黒物質の性質の解明**は素粒子標準模型の修正に関する手がかりを与える

⇒ どのようにして未知のDMを発見・特定するのか？

① 加速器実験 (作り出す)

欧州原子核研究機構 (CERN)

LHC加速器

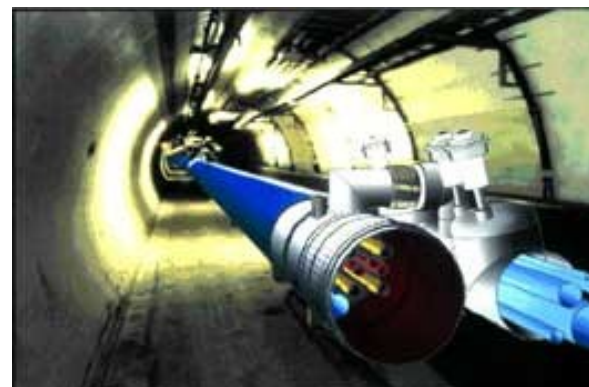
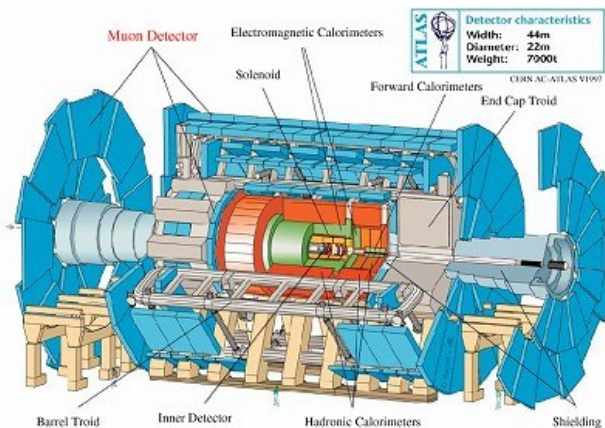
反応の検出



検出器

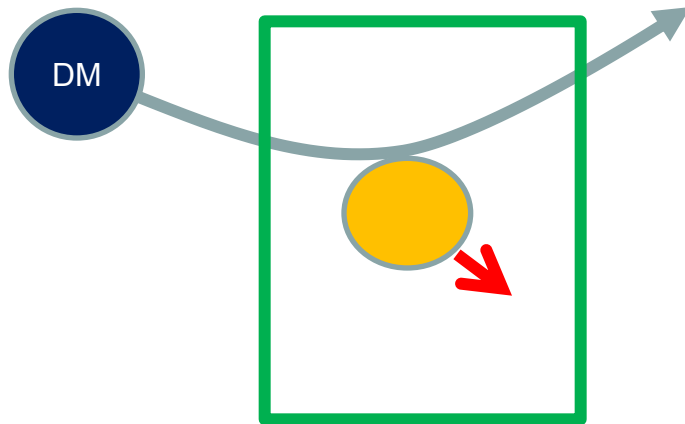
スイス ジュネーブ近郊
スイス・フランス国境

トンネルと
ビームライン



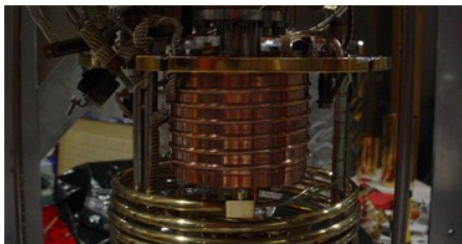
②直接探索（周囲を飛び回っているものを捕まえる）

辺りを飛び回っているDMが観測装置内の標的原子核と衝突した効果を見る



- 原子核の反跳エネルギーを測定
- 原子番号の大きな標的ほど衝突確率は大きくなる
標的原子核：Ge, Xe, ...

CDMS



XENON100



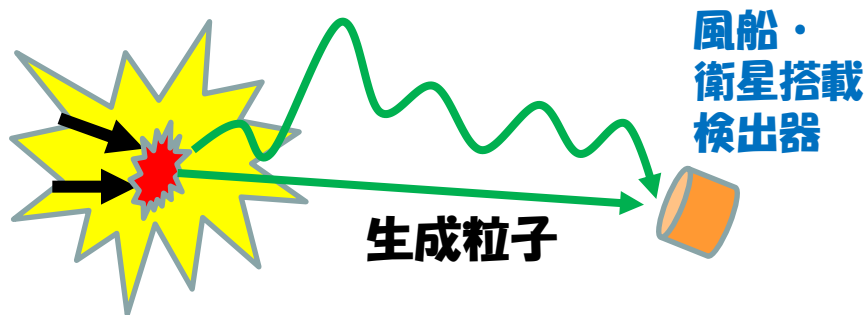
XMASS



DMの質量と相互作用の強さに制限をつける

③ 間接探索 (対消滅により生じた粒子を見つける)

銀河中心など暗黒物質の密集領域での消滅反応の生成粒子 (光子、陽電子、反陽子、ニュートリノ等) を探す

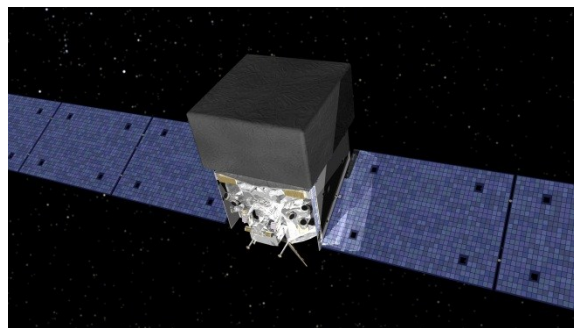


- 粒子の種類とエネルギー分布の測定
- 天体現象起源との区別
- 拡散過程の評価

PAMELA



Fermi-LAT



DMの質量と相互作用の性質や強さの情報

新粒子の予言と発見の歴史

粒子	予言者 (年)	背景	発見年
陽電子	Dirac (1928)	Dirac方程式	1932
ニュートリノ	Pauli (1930)	β 崩壊	1959, 1962
π 中間子	湯川秀樹 (1935)	核力	1947
Ω^-	Gell-Mann (1964)	クォーク模型	1964
W, Z	Glashow, Weiberg, Salam (1968)	中性カレント	1983
Top	小林・益川 (1973)	CPの破れ	1995
Higgs粒子	Higgs (1964)	Higgs機構	2012
暗黒物質	??	??	??

**暗黒物質の正体の予言者は誰？
そう、近未来の君かも！**

暗黒エネルギーの正体は？

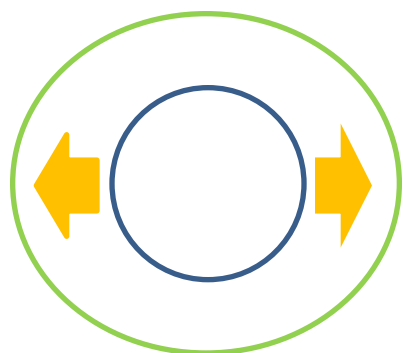
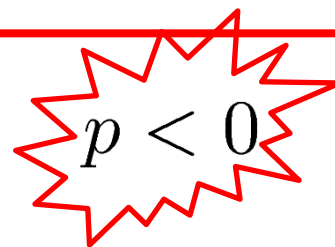
➤ 宇宙は減速膨張していると信じられていた
(暗黒物質を含め通常の物質は減速膨張)

➤ Ia型超新星の観測

⇒ 宇宙は加速膨張している $\rho = 10^3 \text{ eV/cm}^3$

⇒ 特異な性質を持つエネルギーの存在

加速膨張を実現するエネルギー



$$\Delta Q = \Delta U + p\Delta V$$

膨張とともにエネルギーは増大!

$$\Delta Q = 0, \Delta V > 0$$

暗黒エネルギー

過去に考えられた暗黒エネルギー

- ・ アインシュタインの宇宙項

定常宇宙を実現するために導入

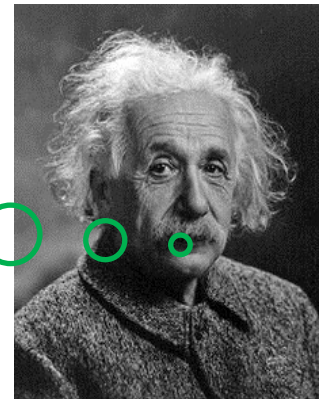
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

生涯最大の誤りだった！
(Eselei in German)

愚行

$$\rho_{\Lambda} = \frac{\Lambda}{8\pi G} = -p_{\Lambda} \Rightarrow w_{\Lambda} = -1$$

ダークエネルギーの有力な候補



他のこのようなエネルギーの例

- 真空のエネルギー

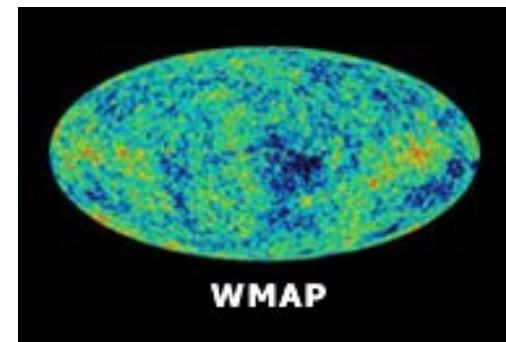
- 量子効果として出現

- 初期宇宙における急激な加速膨張
(**インフレーション**)の実現



- 膨張宇宙の問題点を解決

- 宇宙背景放射の揺らぎの特徴を説明



ただし、これらは今回の加速膨張の説明に必要なエネルギーの大きさとはその**スケールが大きく異なる**

ヒッグス粒子も真空エネルギーをもたらす

ヒッグス粒子のもたらす真空のエネルギーは
暗黒エネルギーの起源とない得るのか？ **NO**

- 大きさが全く異なり、逆に今の宇宙には何も存在しなくなってしまうという矛盾をもたらす！ $\sim 10^{55}$ 倍
- むしろ、どうして零にするかが大問題

超対称性の導入（暗黒物質候補も出てくる）

⇒ 完全な解決には程遠い

どうして、暗黒エネルギーはこんなに小さいのか？

暗黒エネルギーの正体は、大きな謎！！

素粒子物理の今後

- 宇宙の観測結果と今回のヒッグス粒子の発見を合わせて考えると、答えられない謎が新たに生まれていることが分かる
- これらの解明は、素粒子の標準模型を越える理論への重要な方向性を与えてくれるはず
- 当面の課題「暗黒物質の正体」について正しい予言を与えるのは誰？

君かも！！

終わり