

2003年度「宇宙の物理学」
特別講義2003年6月2日



CMB and DM

(Cosmic Microwave Background and Dark Matter)

~宇宙のムラムラ具合を見て
黒さを知るはなし~

理学研究科宇宙線研究室

助手 身内賢太郎



はじめまして

- ◆ 身内賢太郎、宇宙線研究室の助手です。
- ◆ 東大で暗黒物質探索実験(神岡)やって博士論文書いて、去年京都に来ました。
- ◆ 今は μ -PIC(ガス検出器)の開発をしています。
- ◆ 今日は宇宙背景輻射(CMB)の話から、暗黒物質(DM)の話につなげます。
- ◆ 今日の講義の内容は

- http://www-cr.scphys.kyotou.ac.jp/member/miuchi/education/lecture/2003_1st/

にupしますし多分試験とかにも関係ないだろうからノート取らずにお気楽に聞いてください。

理学部5号館223号室 miuchi@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

参考文献など

- ◆ 杉山直 「膨張宇宙とビッグバンの物理」
岩波書店 岩波講座 物理の世界 地球と宇宙の物理 5
- ◆ NASA/WMAP Science Team
(<http://lambda.gsfc.nasa.gov>)
- ◆ NASA/WMAP Science Team
(<http://map.gsfc.nasa.gov>)

1. CMB: 宇宙背景輻射

- ◆ っていうか、何？
- ◆ どうやって見たん？
- ◆ どんくらいムラムラしてるん？
- ◆ で、ムラムラの正体は？
- ◆ 宇宙の黒さは？

WMAPの最新結果
衛星、検出器の話
定量評価
最低限の宇宙論
宇宙の組成

2. DM: 暗黒物質探索実験

- ◆ 細々と。。。
- ◆ おまけで見れんかな？
- ◆ やっぱ直視したいね。

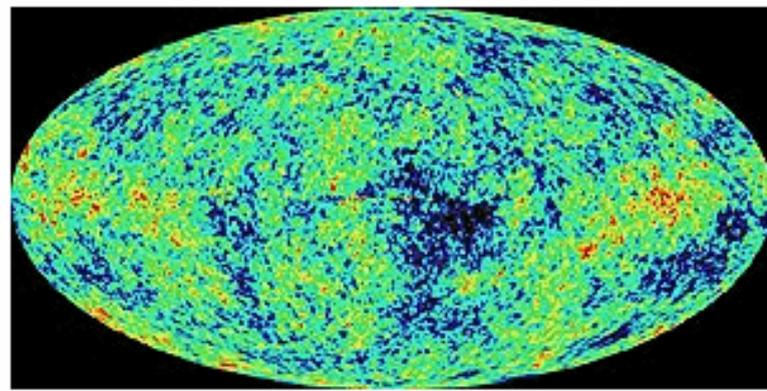
アクション探索
間接探索
直接探索

WMAPの最新結果

宇宙の年齢は137億歳、姿は平らで永遠に膨張

2/12 Asahi.com

宇宙の年齢は137億歳、平らで永遠に膨張を続ける。米航空宇宙局（NASA）は11日、人工衛星でとらえた誕生直後の宇宙の様子を公開し、その「姿」を明らかにした。これまでも130億歳以上で、平らなどと推定されていたが、NASAは人工衛星で詳細に観測して分析。宇宙をめぐる様々な議論を決着させる成果だという。



NASAは、WMAPという衛星で、宇宙誕生の大爆発（ビッグバン）から38万年後の宇宙から降り注ぐ電波（宇宙背景放射）の温度などを100万分の1度の精度で観測。宇宙の温度分布図をつくった。

誕生して38万年後の宇宙の温度分布図。赤が高く、青は低い＝NASA提供

宇宙全体のエネルギーのうち、水素など星を形作るふつうの物質は4%にすぎず、正体不明の暗黒物質（ダークマター）が23%。73%はアインシュタインが予言した宇宙定数（ダークエネルギー）だった。

形は、曲がっていたり、反っていたりするのではなく、平らであることがはっきりし、誕生直後に爆発的に膨張（インフレーション）したことも確実になった。宇宙が将来、収縮に転じてつぶれる可能性はなくなった。

国立天文台の杉山直教授（宇宙論）は今回の結果から宇宙の大きさは800億年後に今の100倍になると計算。「これまで予想されていたことが格段に高い信頼度で明らかになった。宇宙論は証明できないところから精密な科学になったといえる。ただ宇宙のほとんどを占める物質は

Road to WMAP

(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

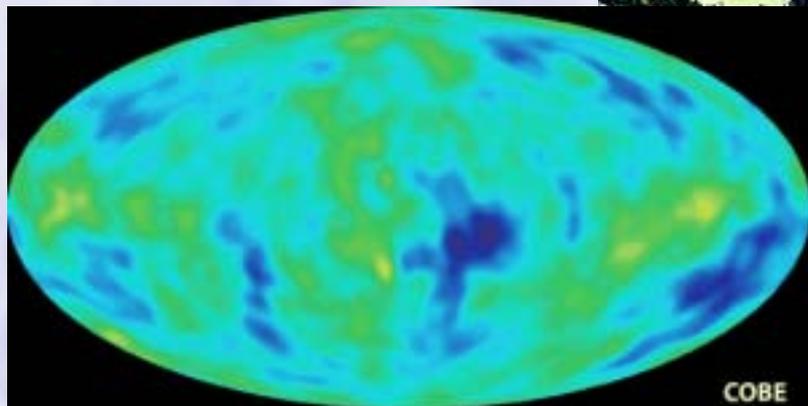
1965: Penzias & Wilson

宇宙3K 輻射



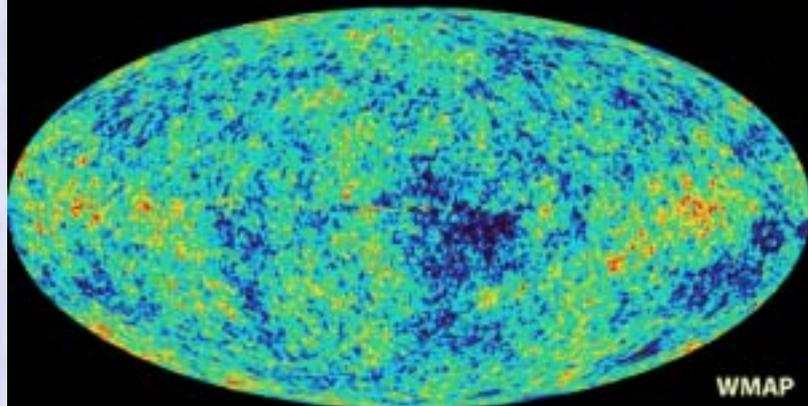
1992: COBE

- ・黒体輻射に一致
- ・ムラムラを発見 (3K に対して $1/10^5$)



2001: WMAP

更に細かい構造



1. CMB: 宇宙背景輻射

- ◆ っていうか、何？
- ◆ どうやって見たん？
- ◆ どんくらいムラムラしてるん？
- ◆ で、ムラムラの正体は？
- ◆ 宇宙の黒さは？

WMAPの最新結果
衛星、検出器の話
定量評価
最低限の宇宙論
宇宙の組成

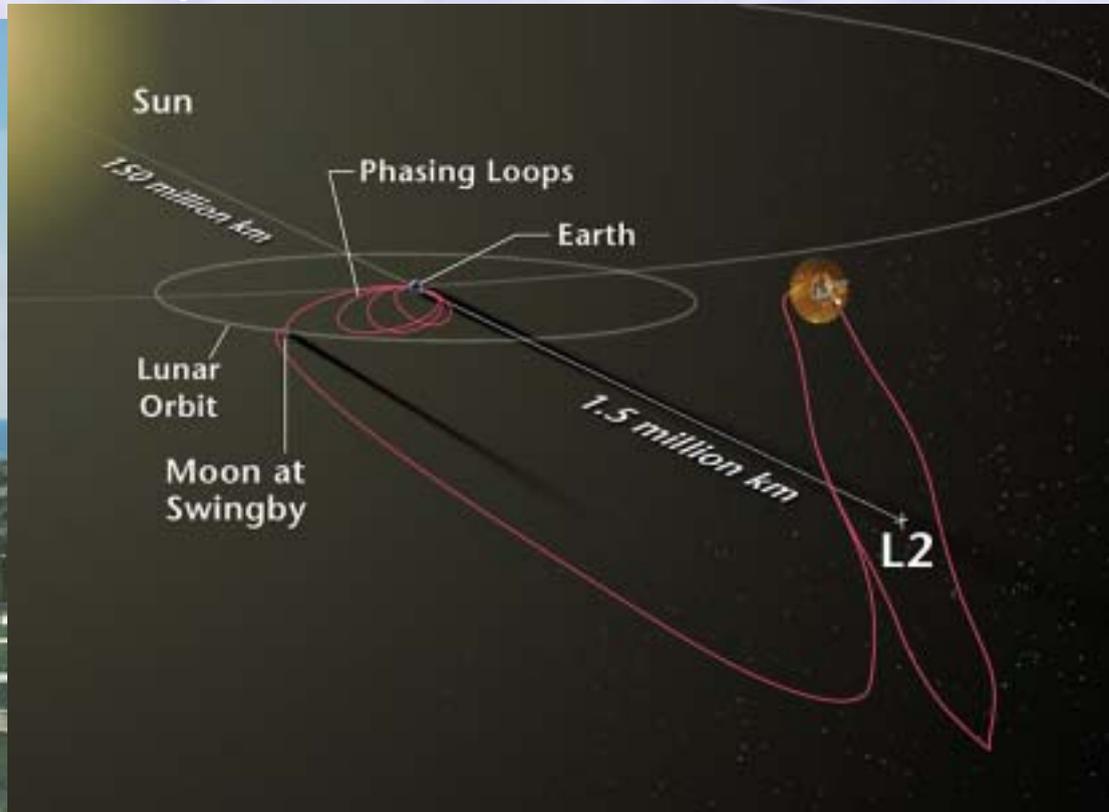
2. DM: 暗黒物質探索実験

- ◆ 細々と。。。
- ◆ おまけで見れんかな？
- ◆ やっぱ直視したいね。

アクション探索
間接探索
直接探索

WMAP衛星

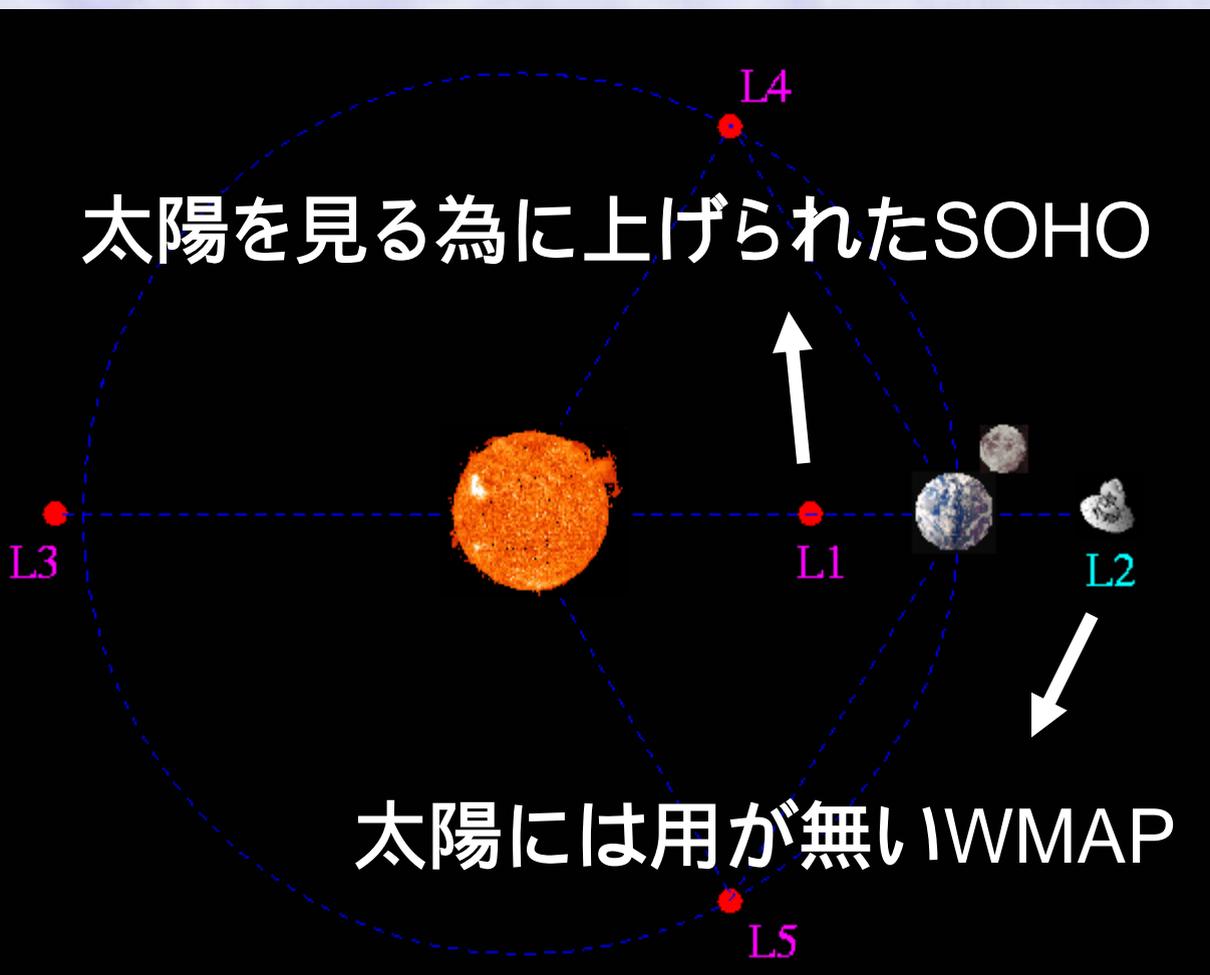
- 2001年6月30日打ち上げ
(Kennedy Spaceflight Center)



- L2 Lagrange points

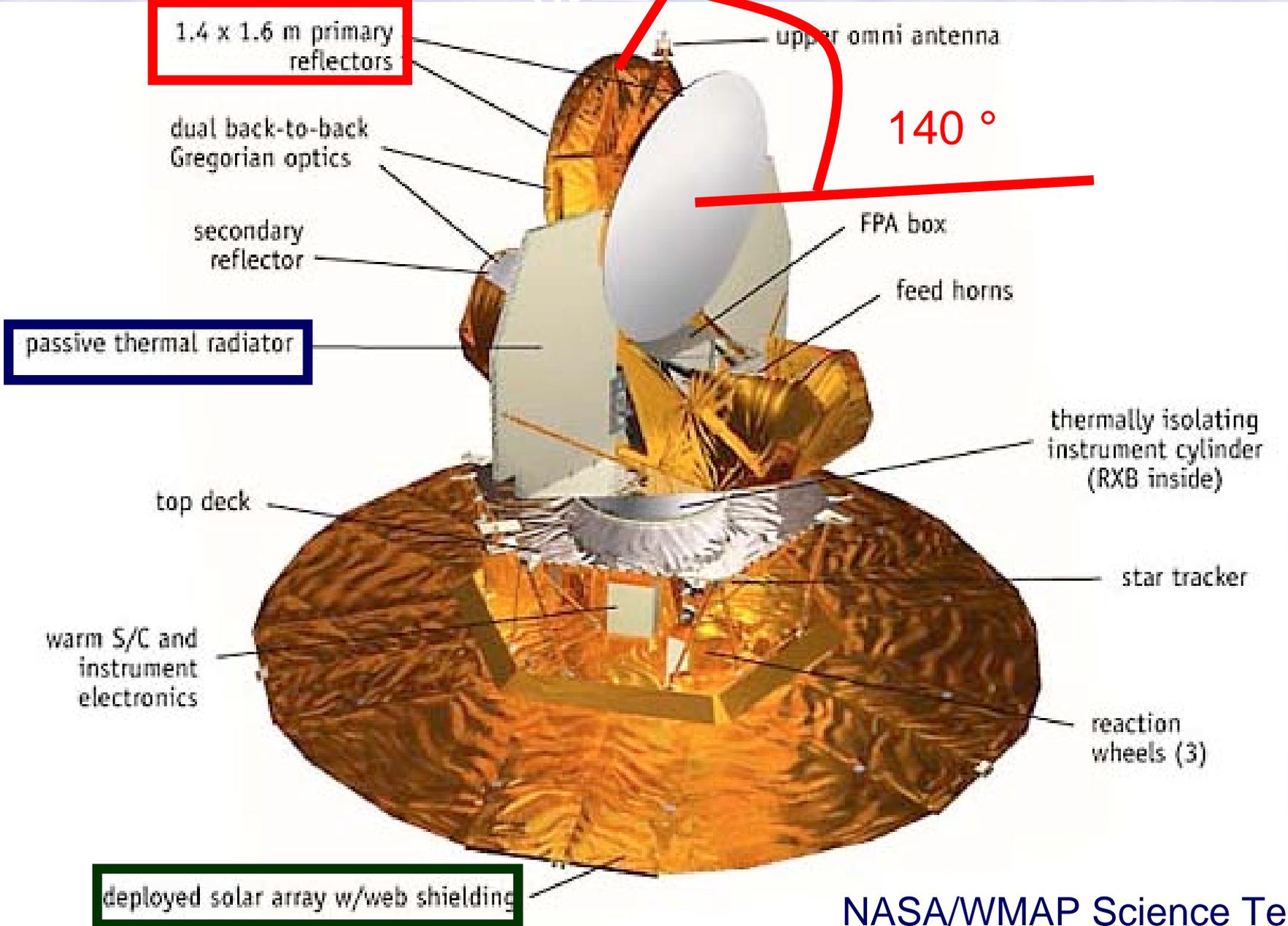
➤ Lagrange points って？

- 地球と太陽の重力で安定な点
- 全部で5点 (L1~L3、L4~L5で若干性質の違い)



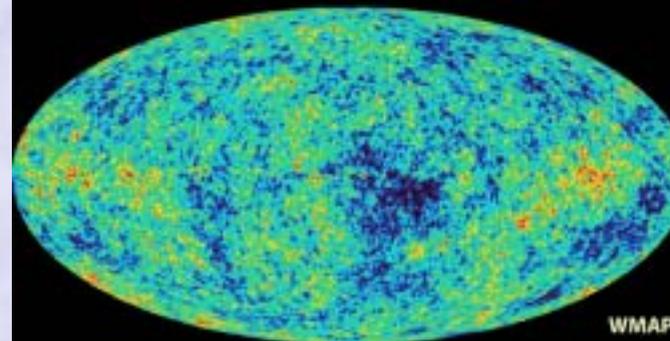
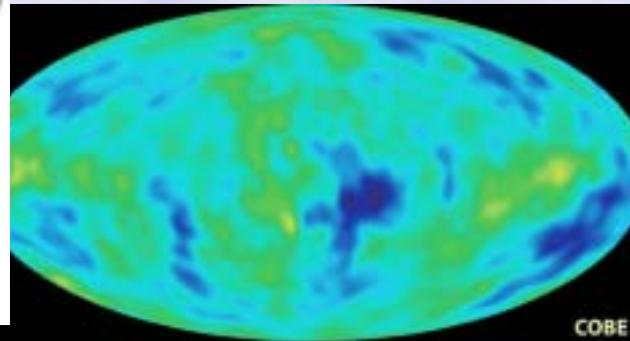
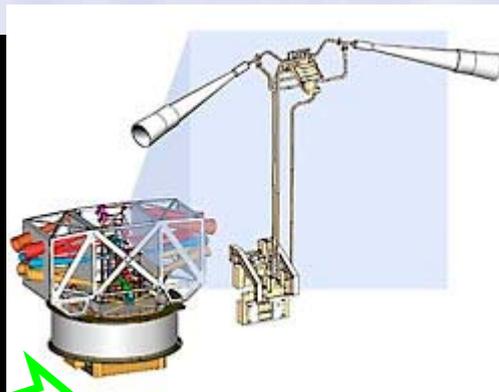
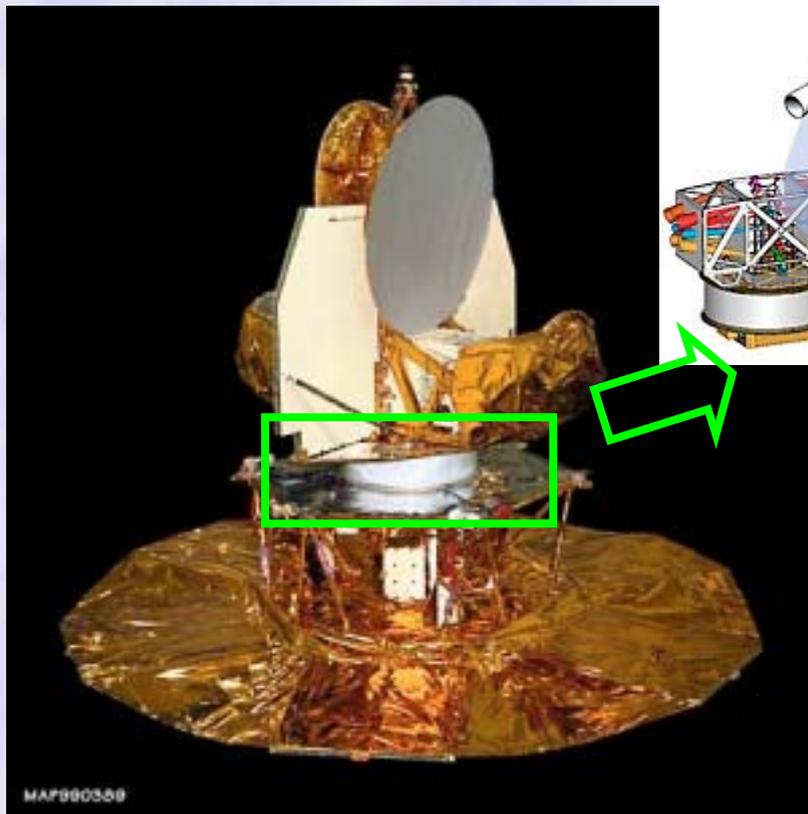
余談ですが、太陽-木星のL4 L5には沢山見つかります。

もっと詳しくWMAP衛星



WMAPの検出器

- 140 ° 離れた二点の温度差を測定
- 22、30、40、60、90 GHz (13~3mm)の5周波数のマイクロ波を観測
- 0.3 ° の角度分解能 (COBEは7 °)



NASA/WMAP Science Team

1. CMB: 宇宙背景輻射

- ◆ っていうか、何？
- ◆ どうやって見たん？
- ◆ **どんくらいムラムラしてるん？**
- ◆ **で、ムラムラの正体は？**
- ◆ **宇宙の黒さは？**

WMAPの最新結果
衛星、検出器の話

定量評価

最低限の宇宙論

宇宙の組成

2. DM: 暗黒物質探索実験

- ◆ 細々と。。。
- ◆ おまけで見れんかな？
- ◆ やっぱ直視したいね。

アクション探索

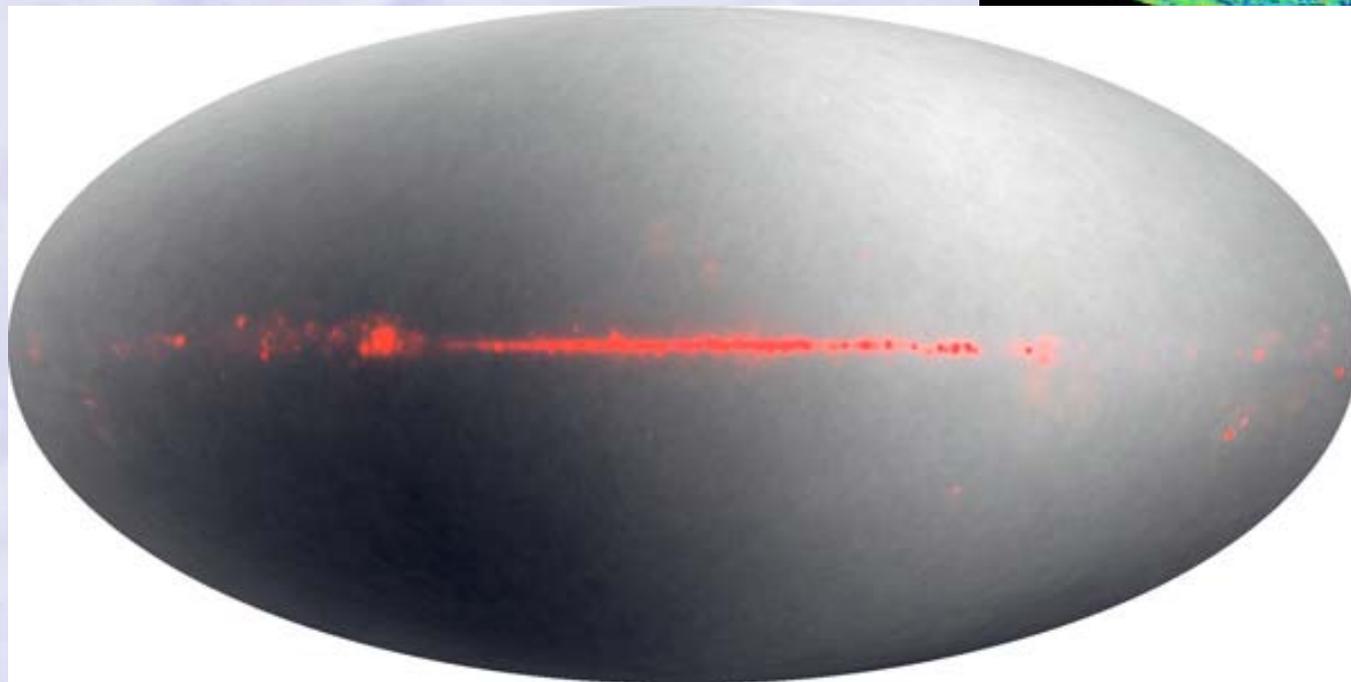
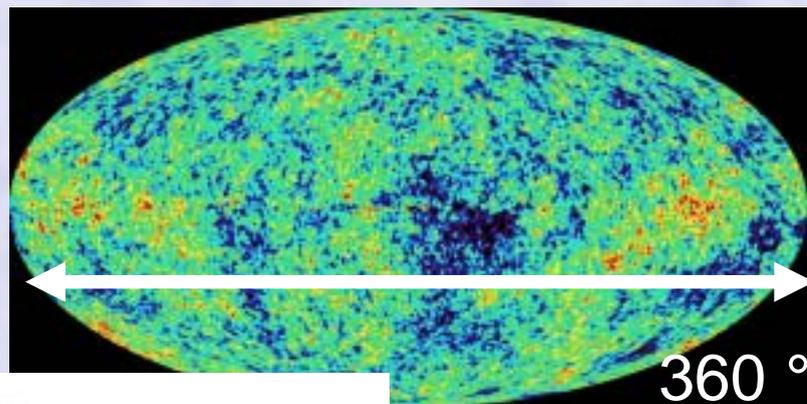
間接探索

直接探索

ゆらぎの定量評価

- 多重極モーメントで展開

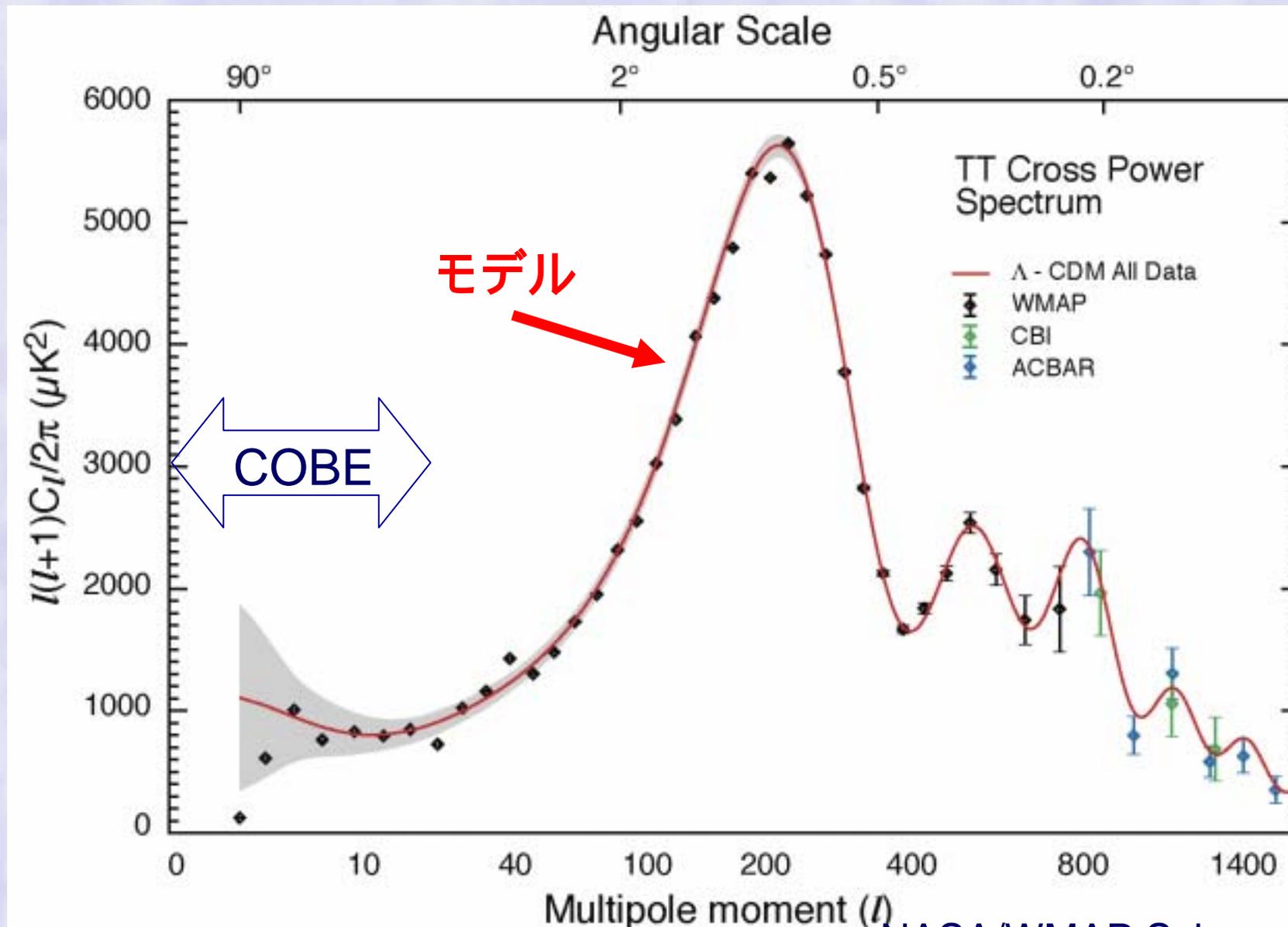
- ・ l : モーメント数
- ・ $l \sim 180$



- $l=1$ 、双極子のイメージ (赤は見ない。)

- ・ 銀河系のCMBに対する運動によるドップラー効果

角度パワースペクトル



◆ WMAP以外の観測

- 地上からのCMB観測：CBI、ACBAR

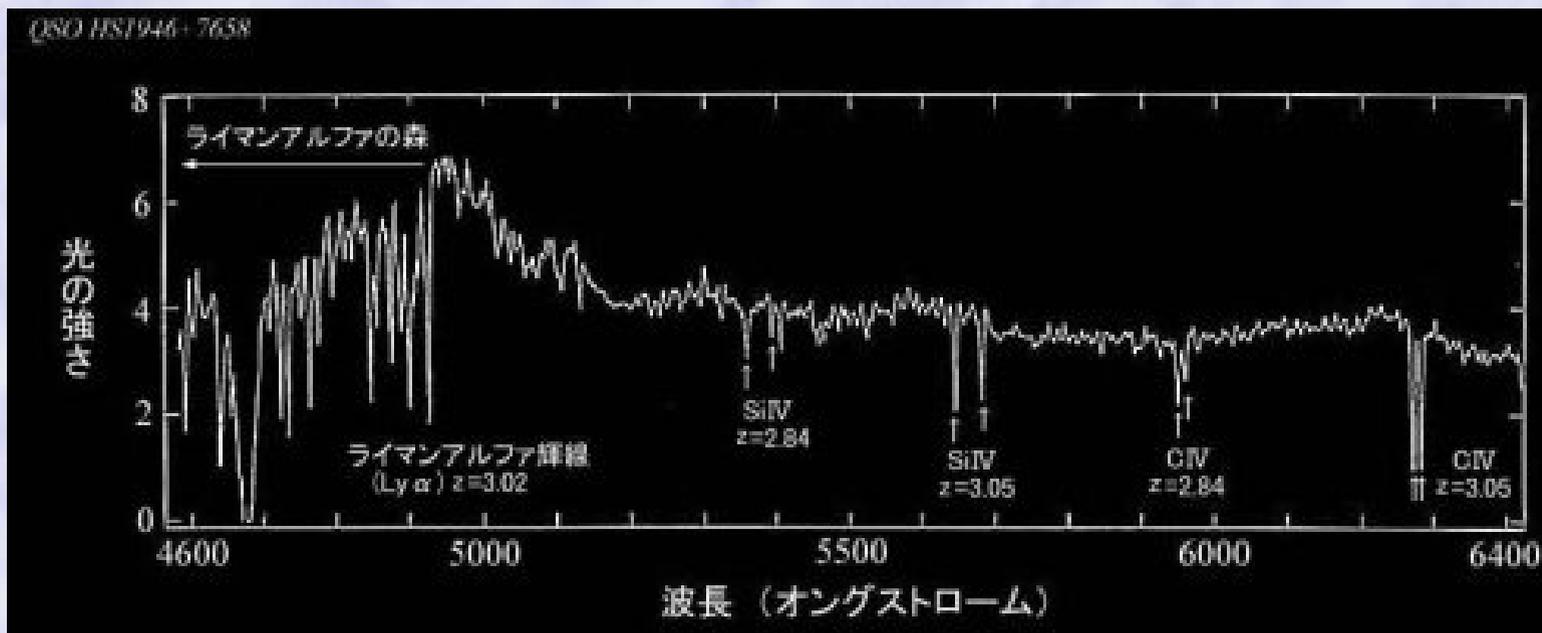
視野は狭いがより細かい構造を見れる

- 地上からの銀河・クエーサーサーベイ：2dFGRS

- Lyman forest



大規模構造を知ることが出来る



1. CMB: 宇宙背景輻射

- ◆ っていうか、何？
- ◆ どうやって見たん？
- ◆ どんくらいムラムラしてるん？
- ◆ **で、ムラムラの正体は？**
- ◆ **宇宙の黒さは？**

WMAPの最新結果
衛星、検出器の話
定量評価
最低限の宇宙論
宇宙の組成

2. DM: 暗黒物質探索実験

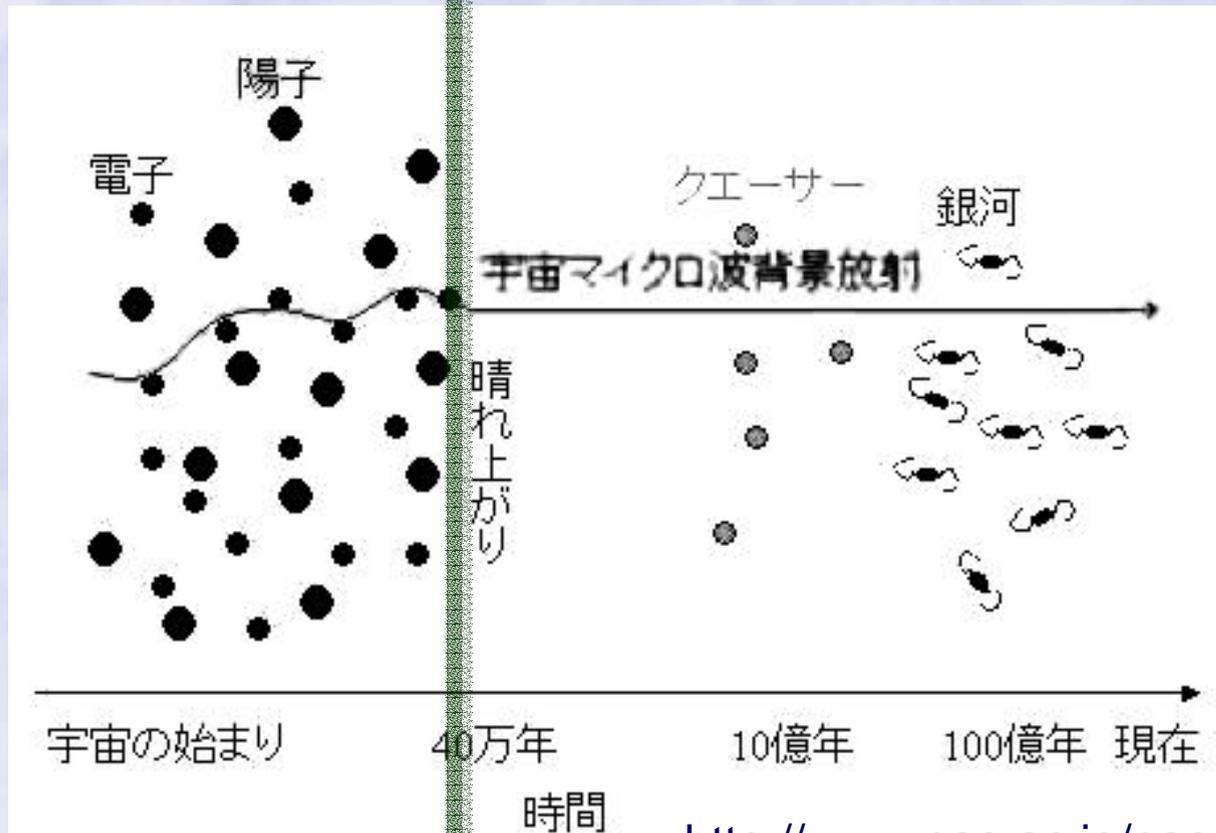
- ◆ 細々と。。。
- ◆ おまけで見れんかな？
- ◆ やっぱ直視したいね。

アクション探索
間接探索
直接探索

宇宙の歴史

- 4万年: 放射優勢 物質優勢
- 40万年: 電子と陽子が結合

光子は散乱相手を失い、宇宙は光子にとって透明に
・ 最終散乱面 / 晴れ上がり / 水素原子形成 / 再結合



暫し板書を。

1. CMB: 宇宙背景輻射

- ◆ っていうか、何？
- ◆ どうやって見たん？
- ◆ どんくらいムラムラしてるん？
- ◆ で、ムラムラの正体は？
- ◆ **宇宙の黒さは？**

WMAPの最新結果
衛星、検出器の話
定量評価
最低限の宇宙論
宇宙の組成

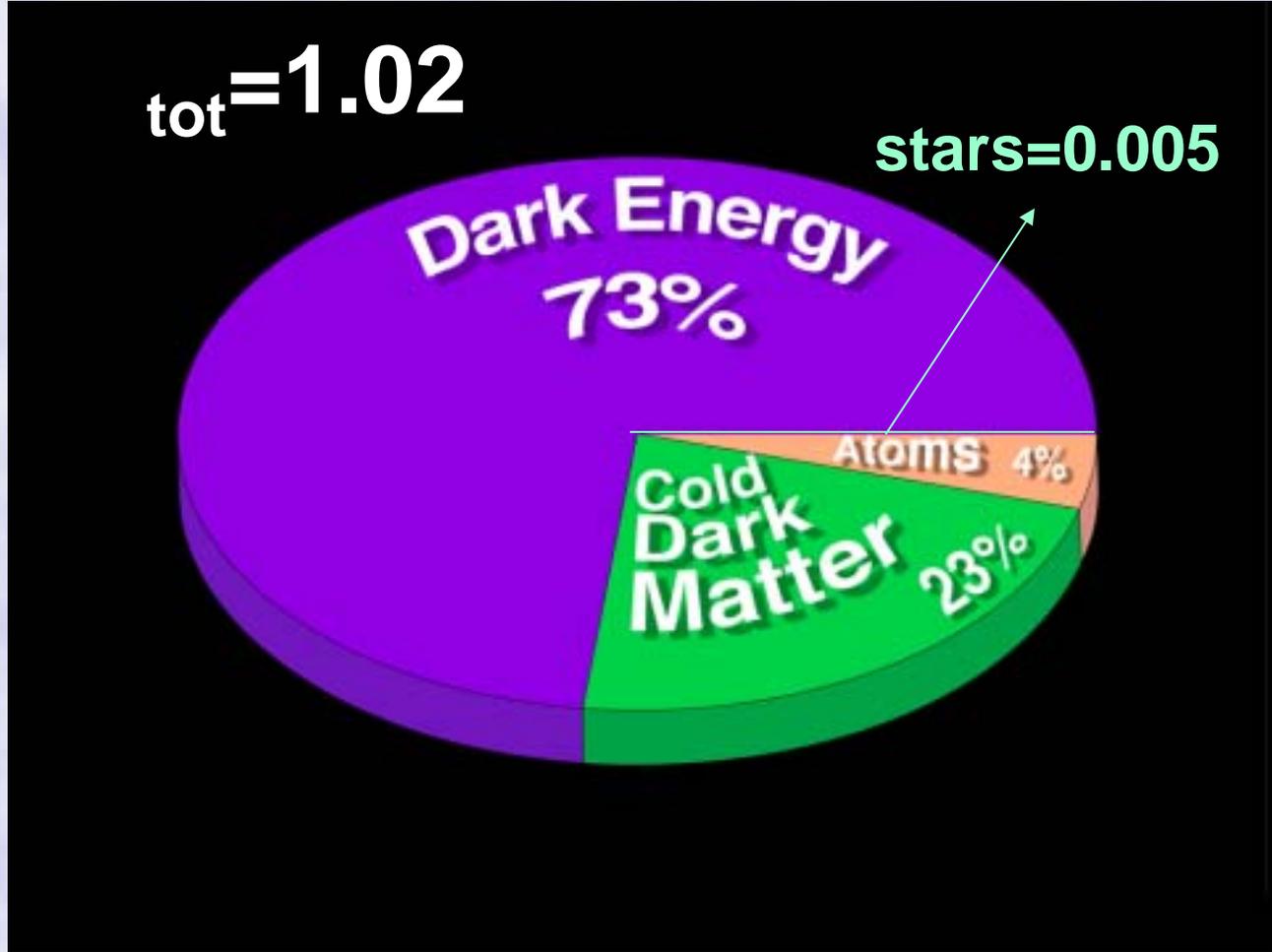
2. DM: 暗黒物質探索実験

- ◆ 細々と。。。
- ◆ おまけで見れんかな？
- ◆ やっぱ直視したいね。

アクション探索
間接探索
直接探索

宇宙の組成

詳細は[astro-ph/0302209](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0302209)に。

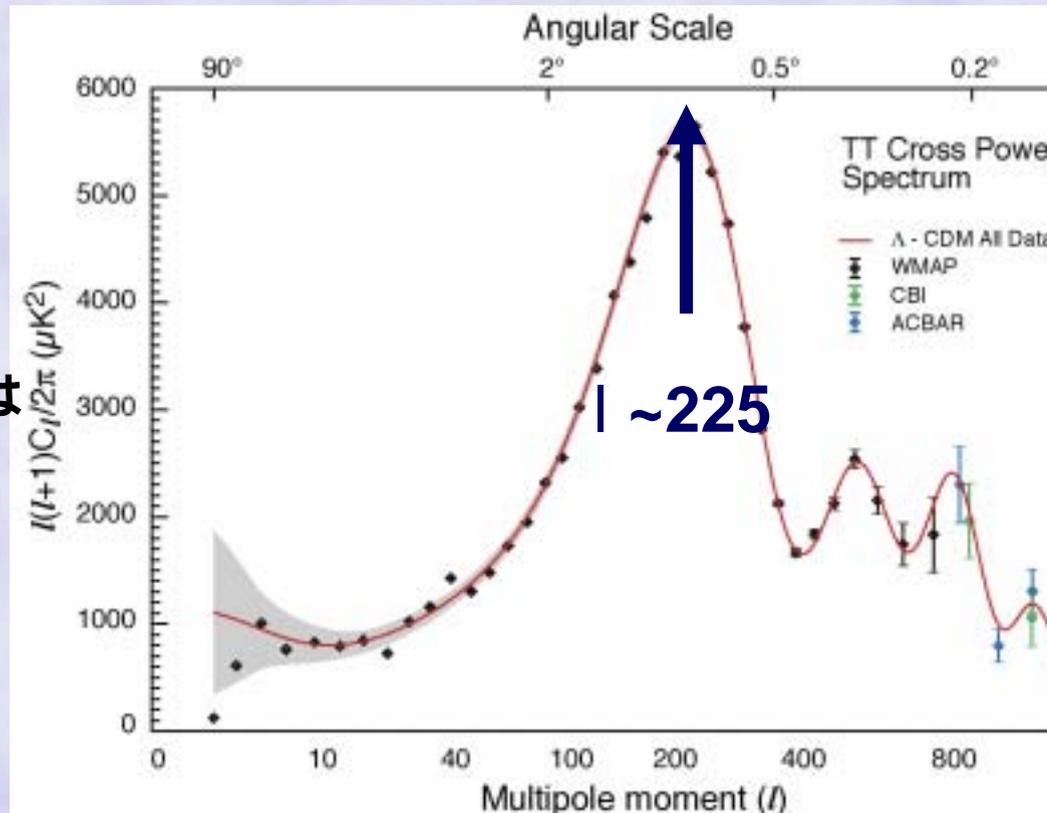


宇宙の曲率

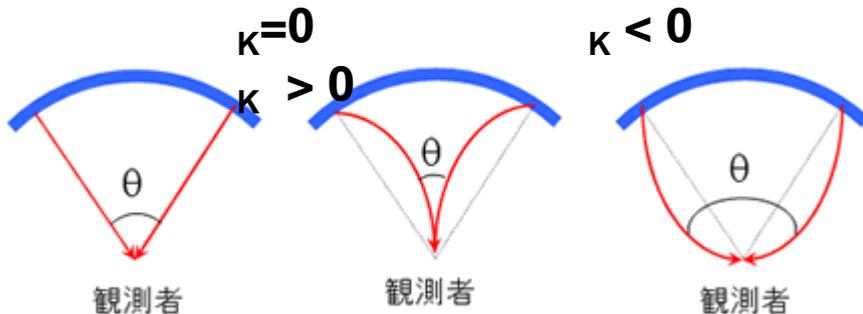
- 第一ピークの位置
- $\kappa = 0$ なら $l = 225$

水素原子生成期の宇宙は
現在 $\sim 0.8^\circ$ に見える。
 $180/0.8=225$

- $\kappa > 0$
見込む角: 大
 $l < 225$



$\kappa < 0$ $l > 225$



曲率は0

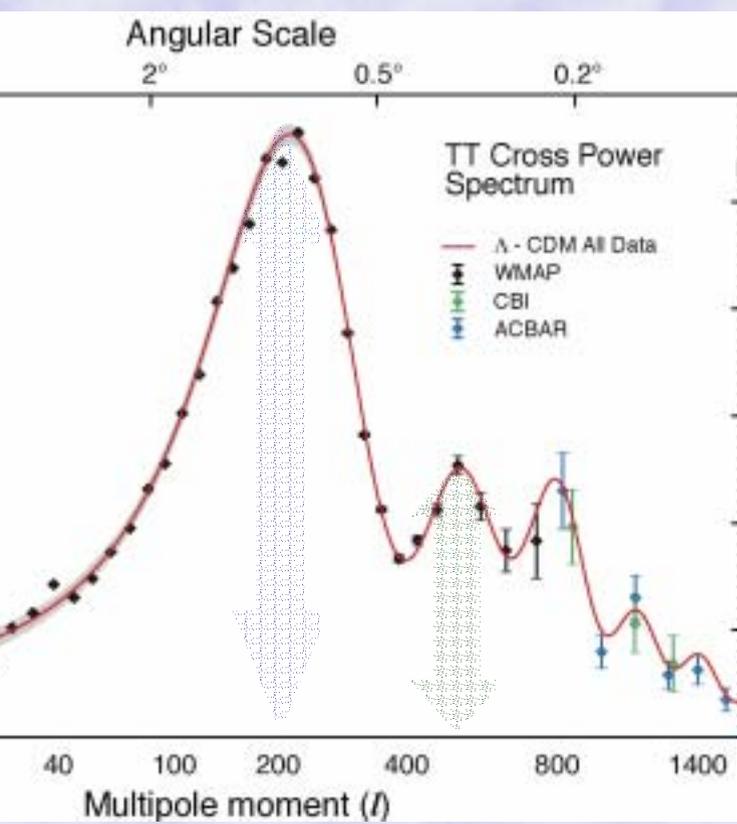


$\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02$

バリオン密度

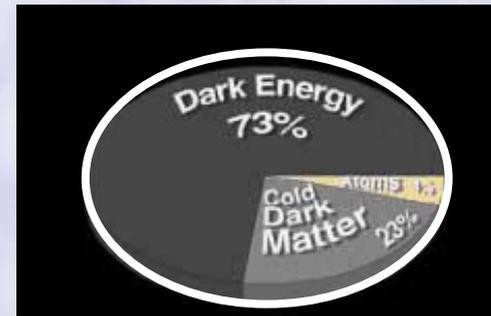
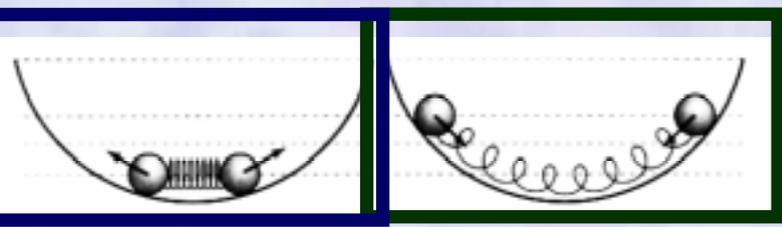
b

第一ピークと第二ピークの高さの比



バリオン - 光子振動と単振動とのアナロジー

- 伸びた状態でスタート
- 重いほど(バリオンが多いほど)縮む
= 第一ピークの高さが増す
- 第二ピークの高さは重さに拠らない
- 比を取ることでバリオン密度が求まる



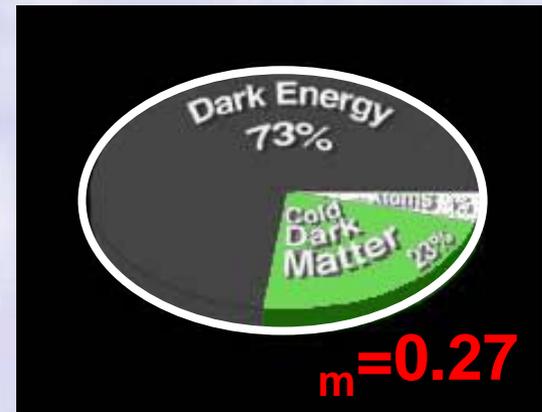
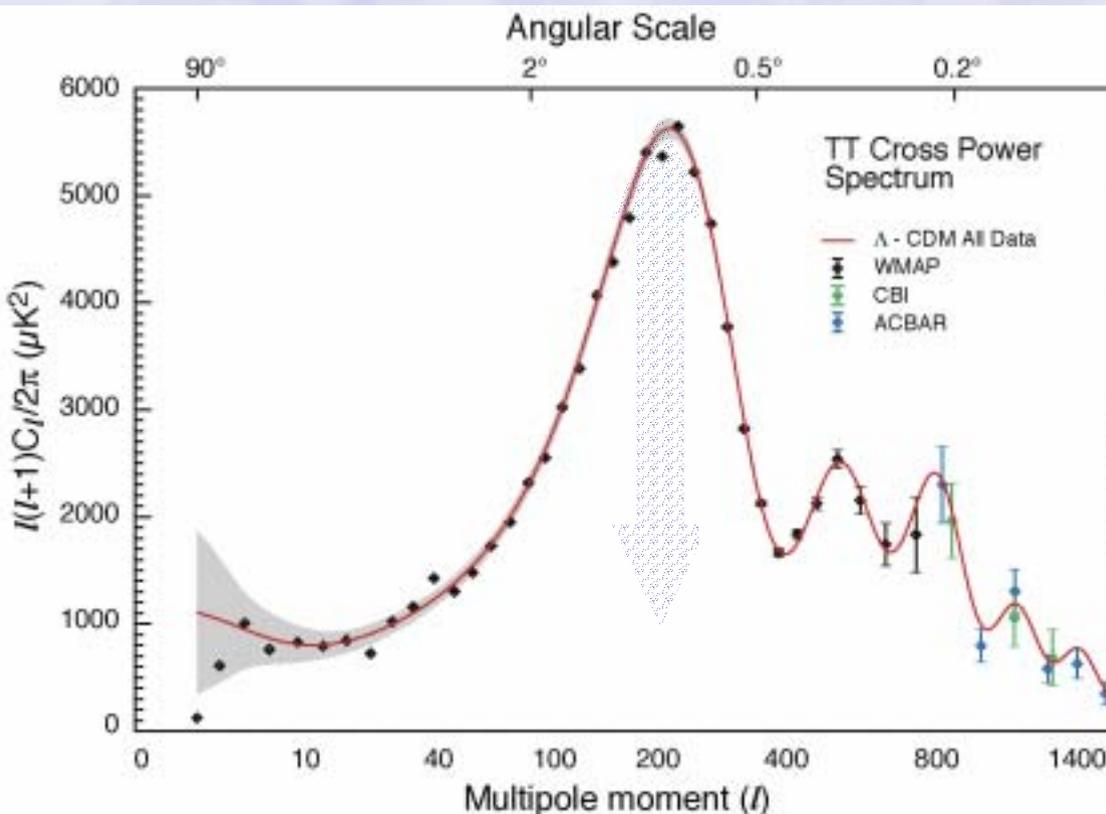
$h = 0.04$

物質密度

m

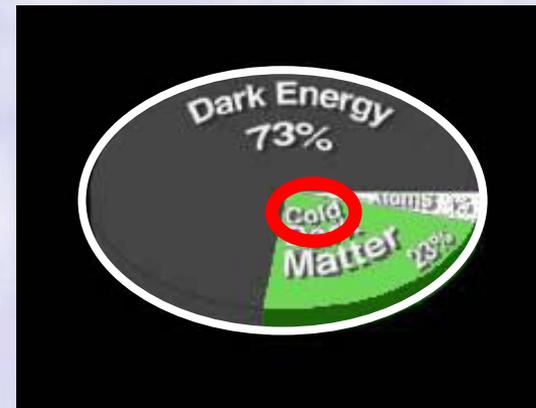
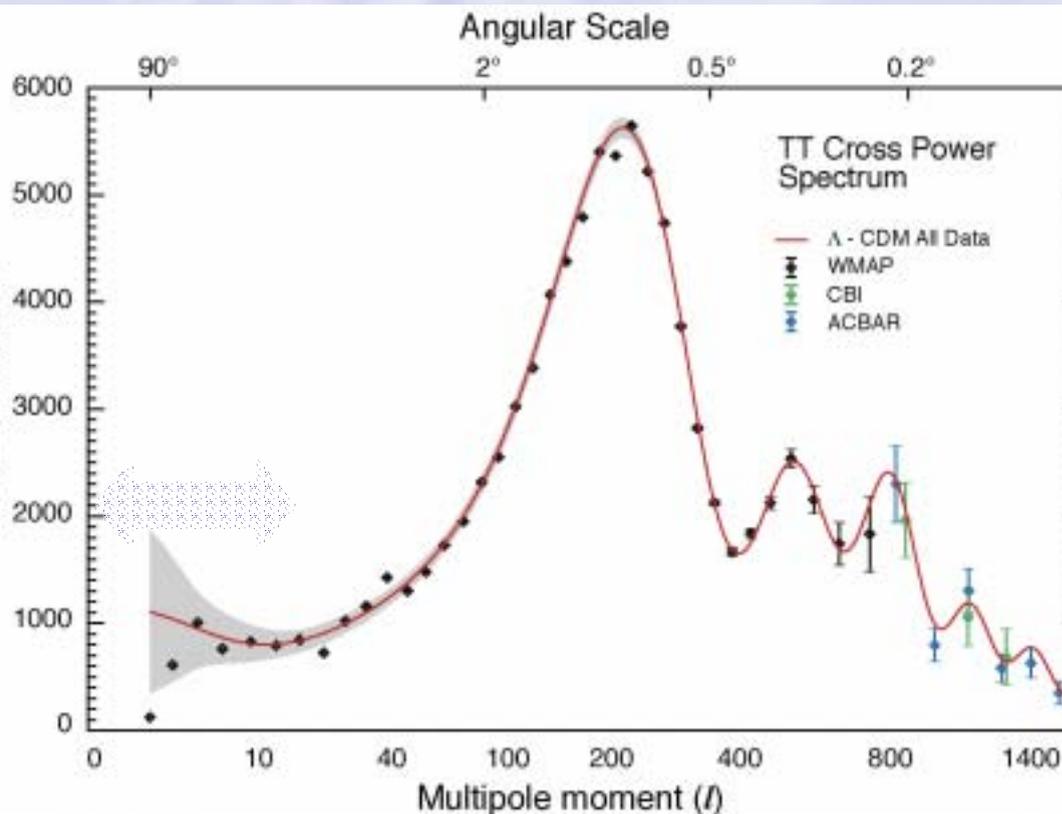
- m 小 放射優勢 - 物質優勢転換期が最近
- ゆらぎは物質優勢になってから
- 放射優勢 - 物質優勢転換期が最近
- m 小 | 小のピークが高くなる

ゆらぎのスケール大



暗黒物質の温度 (=速度)

- CDM (cold dark matter) or HDM (hot DM) ?
- 大規模構造のゆらぎからHDMとして考えられる の 量に制限



$h^2 < 0.076$

DMは冷たい

◆ WMAP一年目の成果

- 「インフレーション+宇宙定数入りの冷たい暗黒物質モデル」の予言とぴたり一致
- 以下WMAP+他の測定の結果

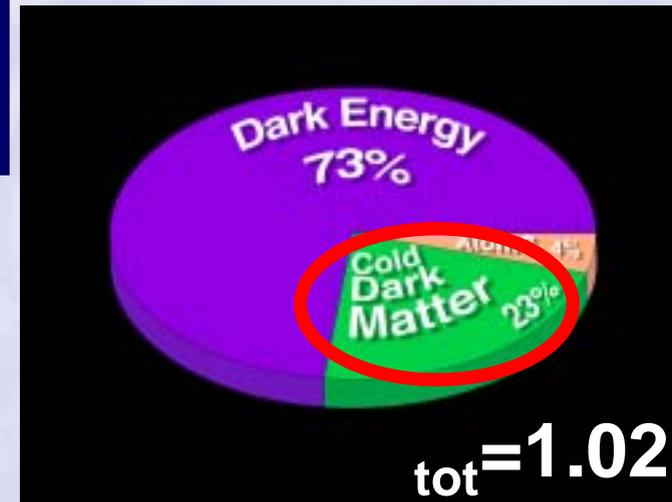
$$h = 0.71^{+0.04}_{-0.03}$$

$$h_m^2 = 0.135^{+0.008}_{-0.009}$$

$$h_b^2 = 0.0224 \pm 0.0009$$

$$h_{\text{tot}} = 1.02 \pm 0.02$$

というわけで、
DM (CDM) 探しますか。



1. CMB: 宇宙背景輻射

- ◆ っていうか、何？
- ◆ どうやって見たん？
- ◆ どんくらいムラムラしてるん？
- ◆ で、ムラムラの正体は？
- ◆ 宇宙の黒さは？

WMAPの最新結果
衛星、検出器の話
定量評価
最低限の宇宙論
宇宙の組成

2. DM: 暗黒物質探索実験

- ◆ 細々と。。。 **アクション探索**
- ◆ おまけで見れんかな？ **間接探索**
- ◆ やっぱ直視したいね。 **直接探索**

アクション探索
間接探索
直接探索

◆ Axion

- QCDにおける強いCP問題の解決の為に、Peccei-Quinnによって1977年に提唱
- $1 \mu\text{eV} \sim 1\text{meV}$ の質量を持てばCDMとなれる
- 磁場中でプリマコフ効果によってマイクロ波に変換される(とされている)

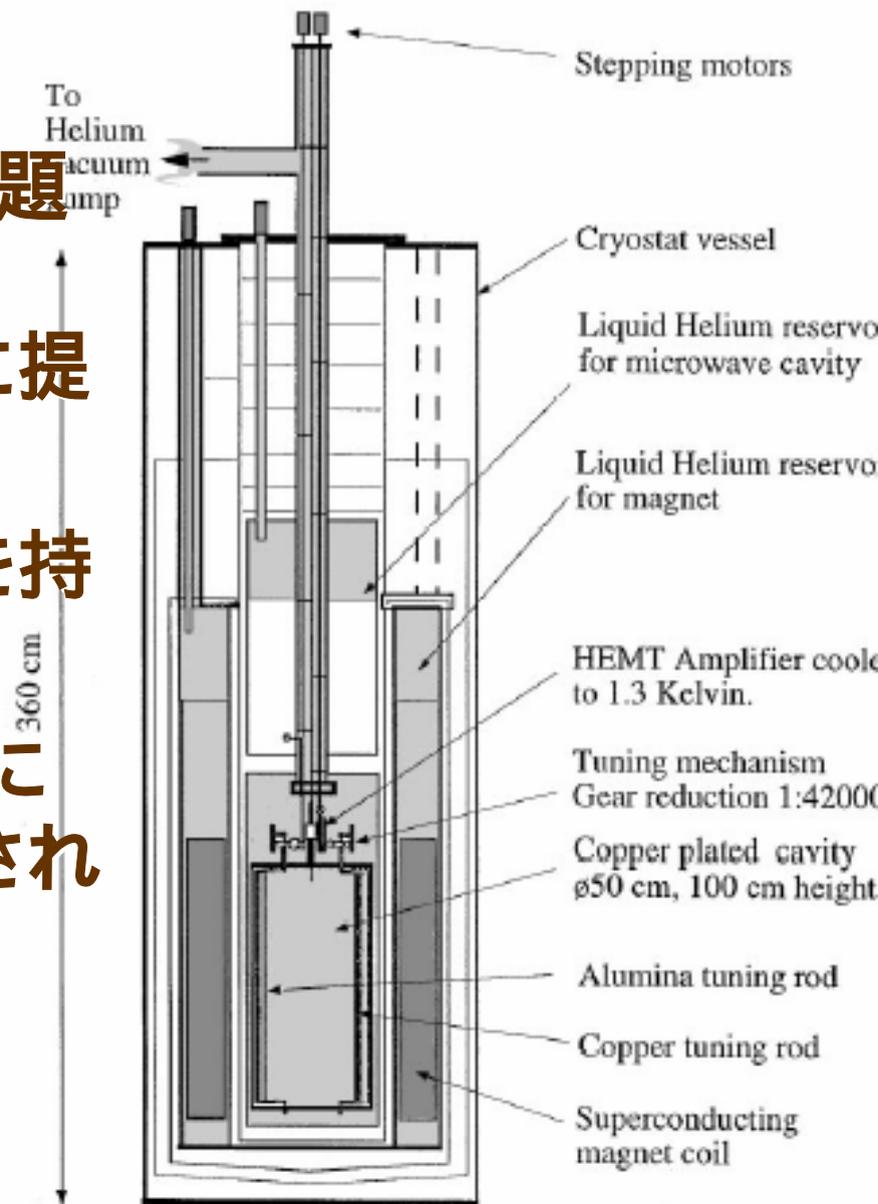
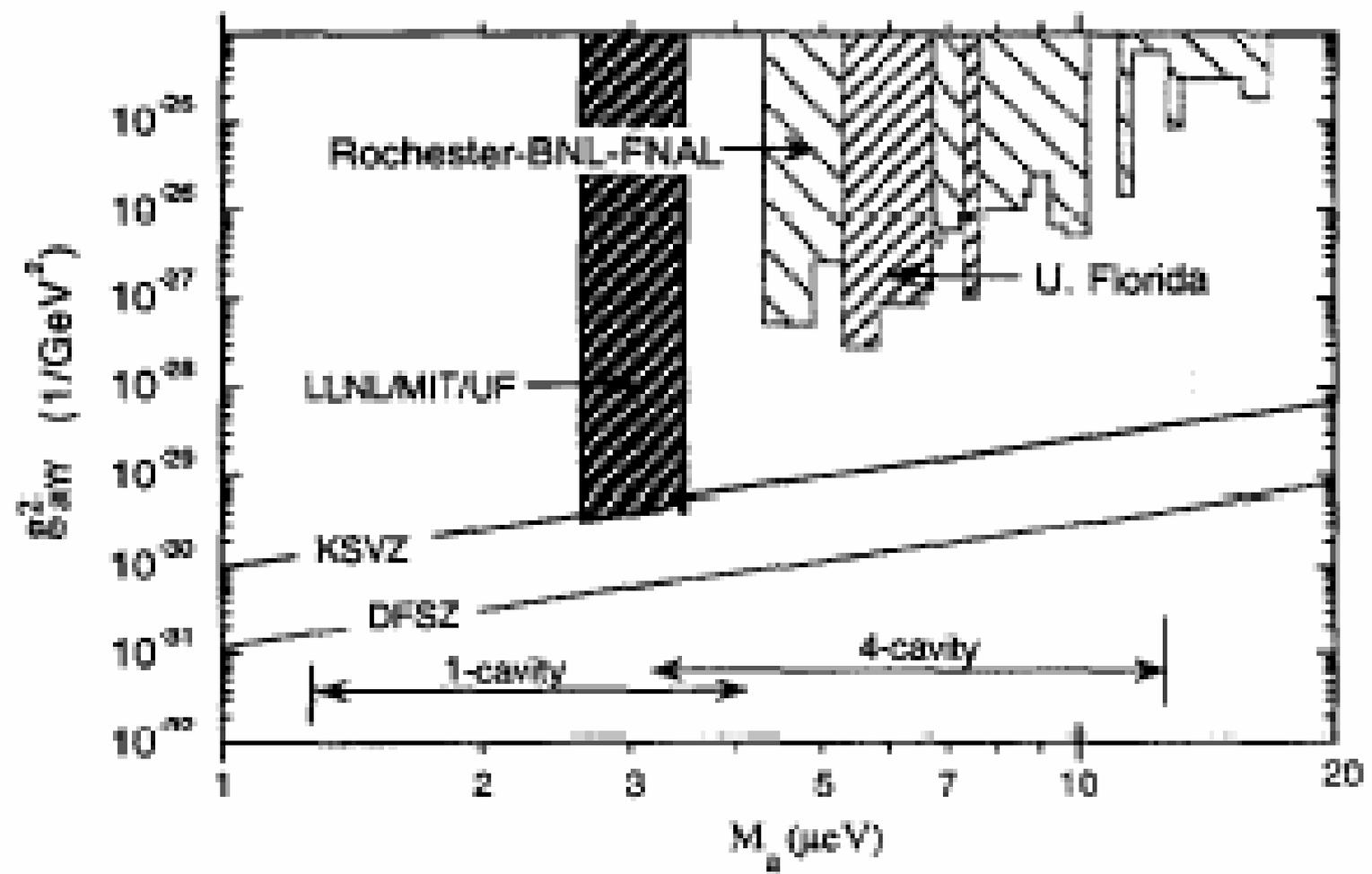


Fig. 1. A drawing of the axion search experiment showing the cryostat and microwave cavity.

◆ Axion探索実験の結果

- まだみつかっていなくて、制限のみ



1. CMB: 宇宙背景輻射

- ◆ っていうか、何？
- ◆ どうやって見たん？
- ◆ どんくらいムラムラしてるん？
- ◆ で、ムラムラの正体は？
- ◆ 宇宙の黒さは？

WMAPの最新結果
衛星、検出器の話
定量評価
最低限の宇宙論
宇宙の組成

2. DM: 暗黒物質探索実験

- ◆ 細々と。。。 アクション探索
- ◆ おまけで見れんかな？ ニュートラリーノ間接探索
- ◆ やっぱ直視したいね。 ニュートラリーノ直接探索

SUSY: 超対称性理論

- 標準理論のヒエラルキー問題解決の為に提唱
- スピン j を持つ通常の粒子に対して
spin $|j-1/2|$ のSUSY パートナー
- Neutralino χ : gaugino と higgsino の線形結合

$$\chi = a_1 \tilde{B} + a_2 \tilde{W}_3 + a_3 \tilde{H}_1 + a_4 \tilde{H}_2$$

$\tilde{B} : \text{bino}$

$\tilde{W}_3 : \text{wino}$

$\tilde{H}_1, \tilde{H}_2 : \text{higgsino}$

}

gaugino

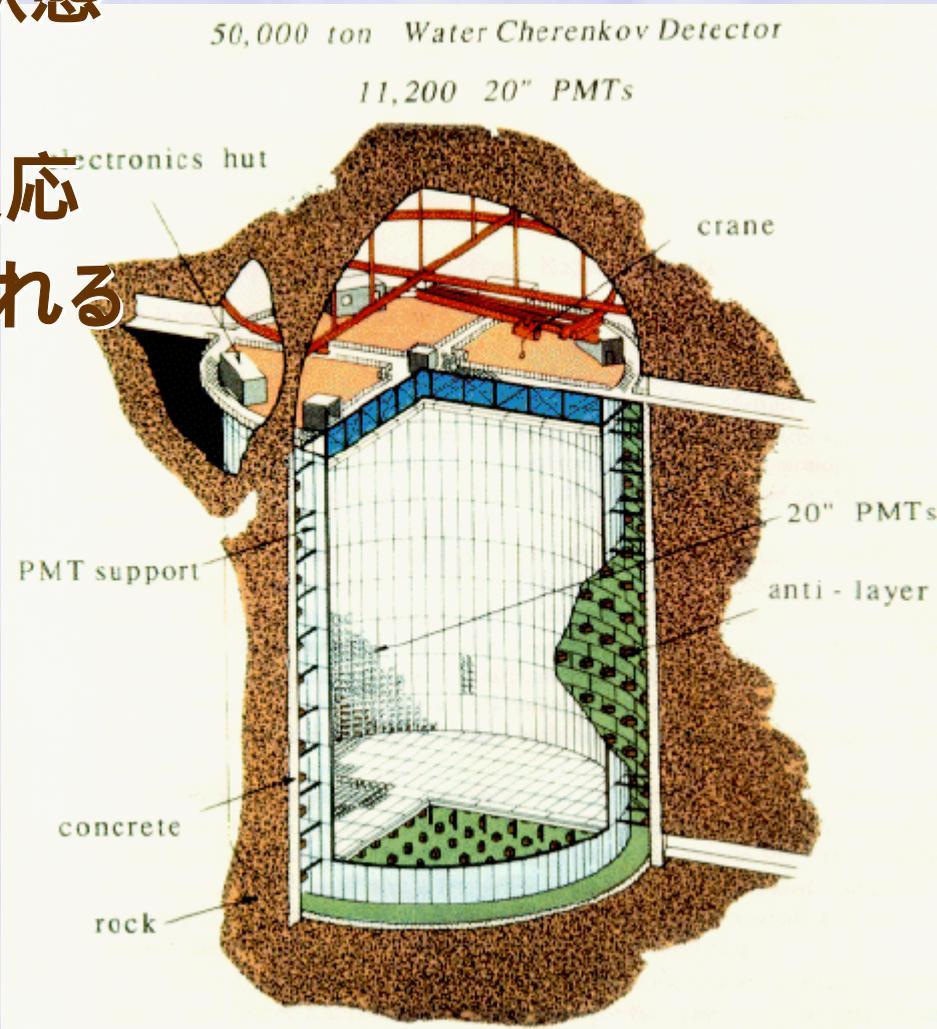
- ニュートラリーノのうちで最も軽いものは安定なので、CDMの良い候補

粒子	spin	spin	SUSY粒子
quark	1/2	0	squark
lepton	1/2	0	slepton
gauge boson	1	1/2	gaugino
Higgs boson	0	1/2	Higgsino

◆ ニュートラリーノの対消滅

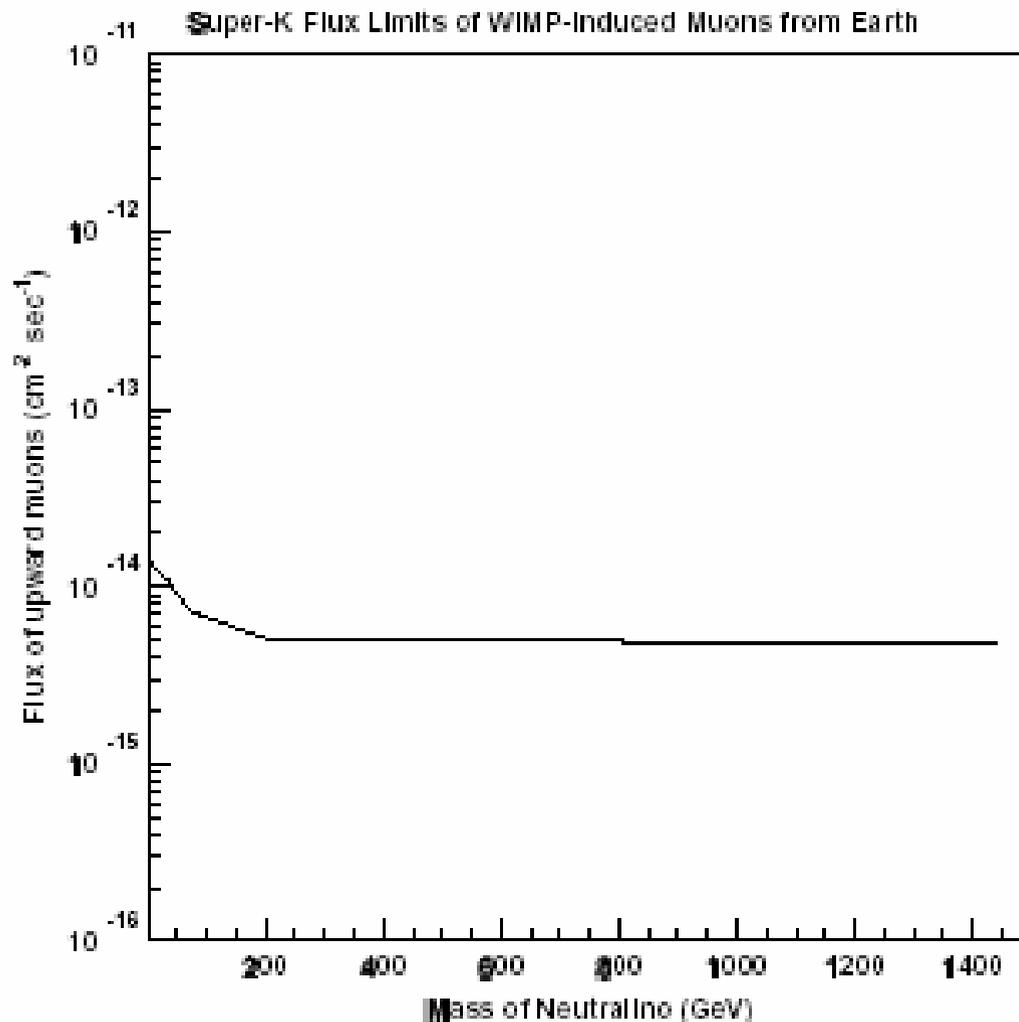
- ニュートラリーノは重力で地球や太陽にtrapされる
- 対消滅して様々な終状態
- μ が飛んできて
検出器の近くで μ と反応
- 上向き μ として検出される

- SK
- ANTARES



◆ 対消滅実験の結果

- やっぱりみつかっていない。fluxに制限。



➤ 加速器による探索実験

● LEP2 $e^- + e^+$ 実験

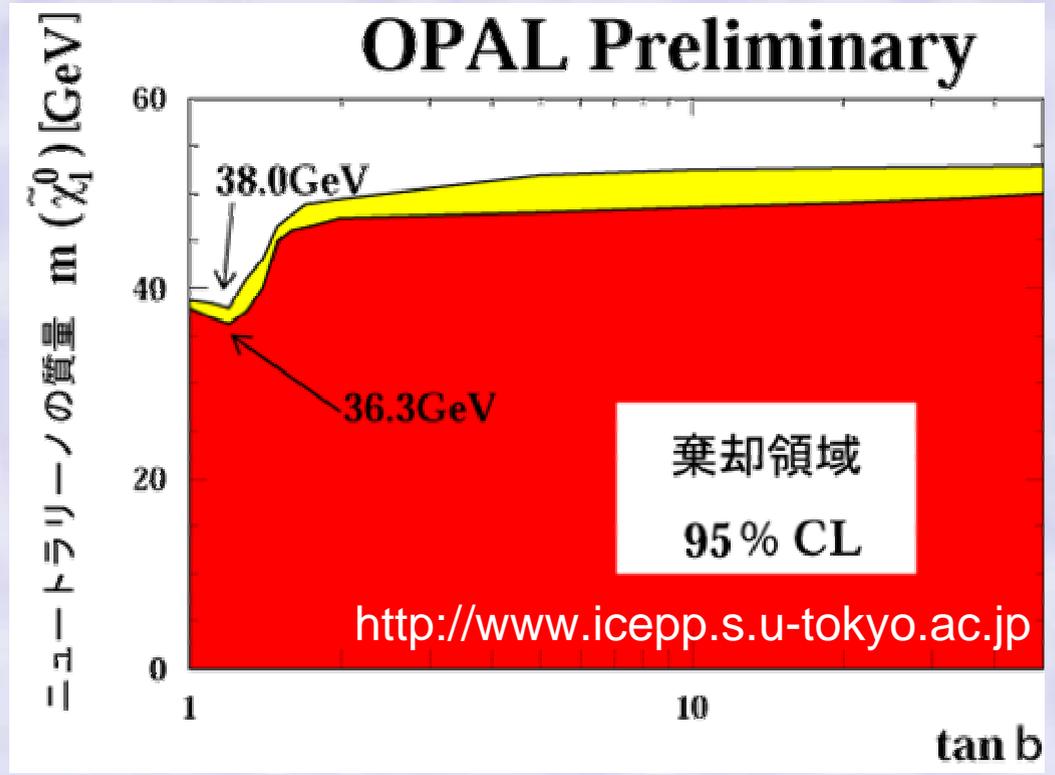
(Zボソンの研究、Higgs探索を主目的)



- Z bosonの崩壊で重いニュートラリーノが生成
- 軽いニュートラリーノへの崩壊過程を見る際にエネルギー抜けとして見える、だろう。

➤ 加速器実験の結果

- もちろんまだ見つかっていなくて、
ニュートラリーノの質量に制限
> 37GeV (PDG2002)



- 今後LHC (Large Hadron Collider)で
2007年よりp+p衝突実験

1. CMB: 宇宙背景輻射

- ◆ っていうか、何？
- ◆ どうやって見たん？
- ◆ どんくらいムラムラしてるん？
- ◆ で、ムラムラの正体は？
- ◆ 宇宙の黒さは？

WMAPの最新結果
衛星、検出器の話
定量評価
最低限の宇宙論
宇宙の組成

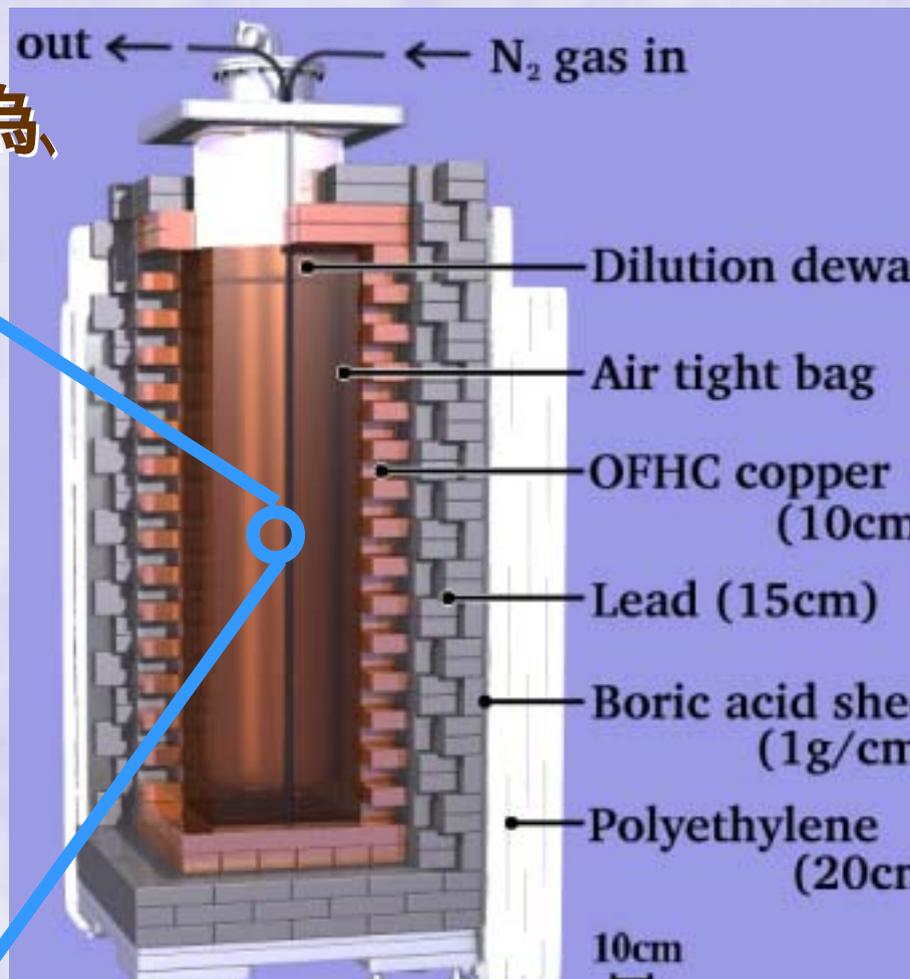
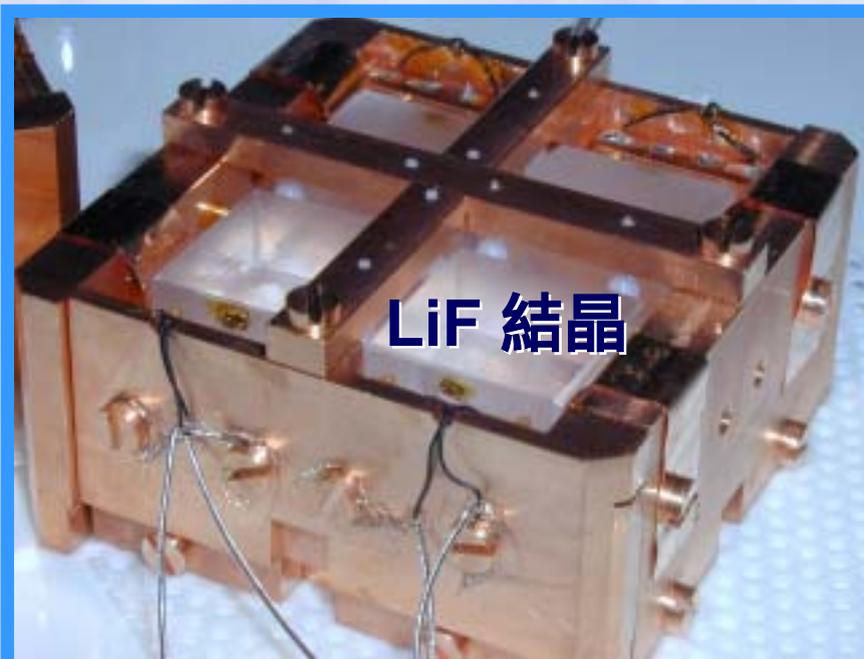
2. DM: 暗黒物質探索実験

- ◆ 細々と。。。
- ◆ おまけで見れんかな？
- ◆ **やっぱ直視したいね。**

アクシオン探索
ニュートラリーノ間接探索
ニュートラリーノ直接探索

◆ 直接探索

- ニュートラリーノと原子核弾性散乱
- もちろんレートは非常に少ない。と思われる
<1event/kg/day
- バックグラウンドを防ぐ為、
地下に潜ってシールド



◆ どうやって「検出」する？

- とりあえずスペクトルから散乱断面積に制限

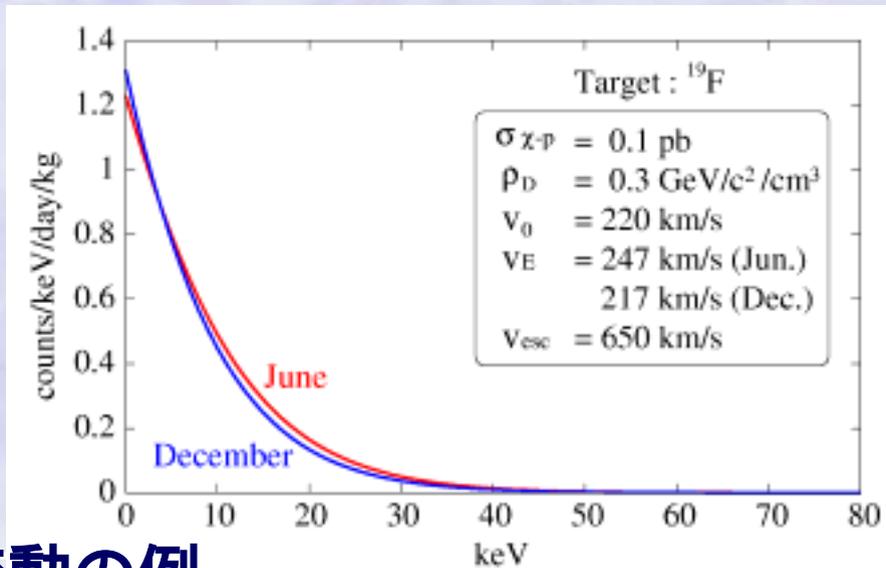
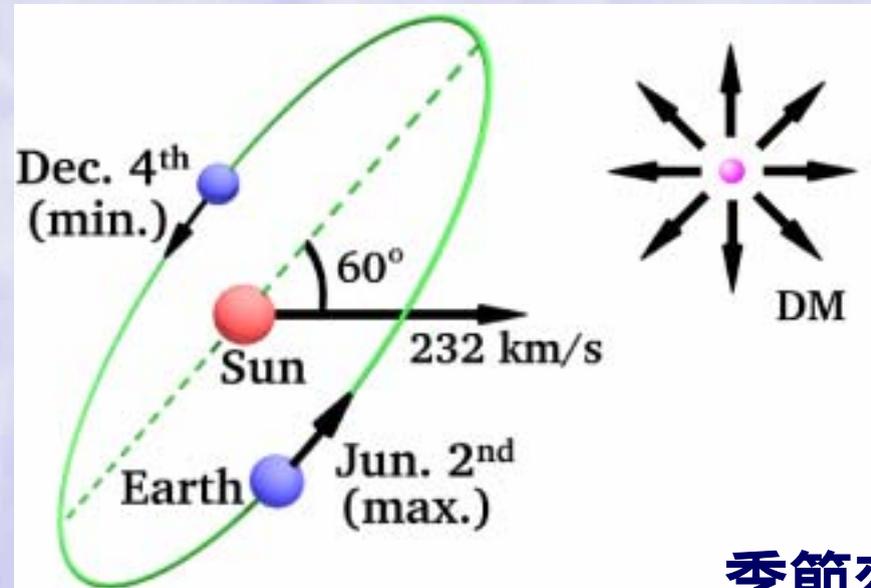
今までのほとんどの実験

- 夏と冬でレートが変わることを利用

イタリアグループ

- ダークマターの風向き測定

今後の展望。身内の野望。



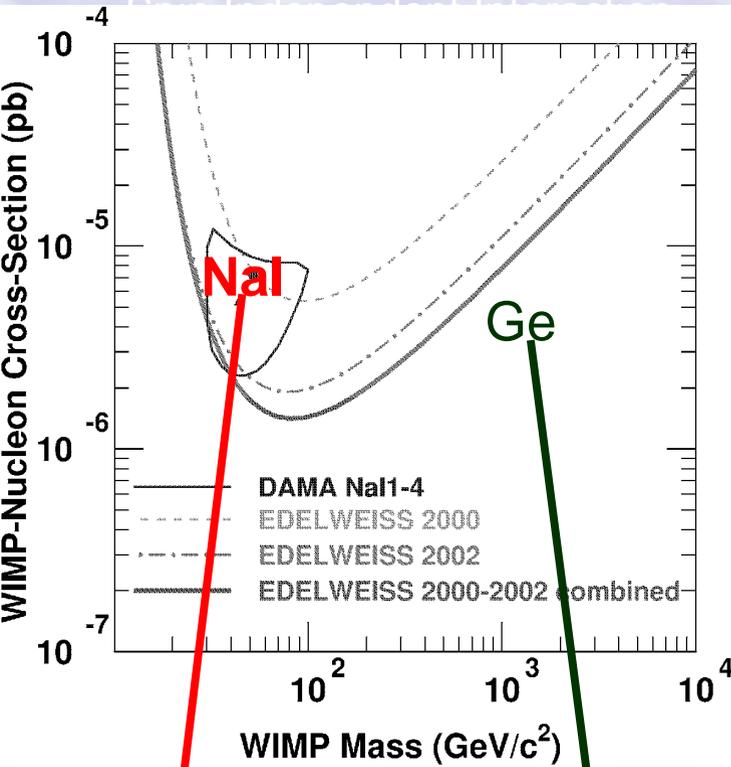
季節変動の例

◆ 現在稼動中の主な検出器

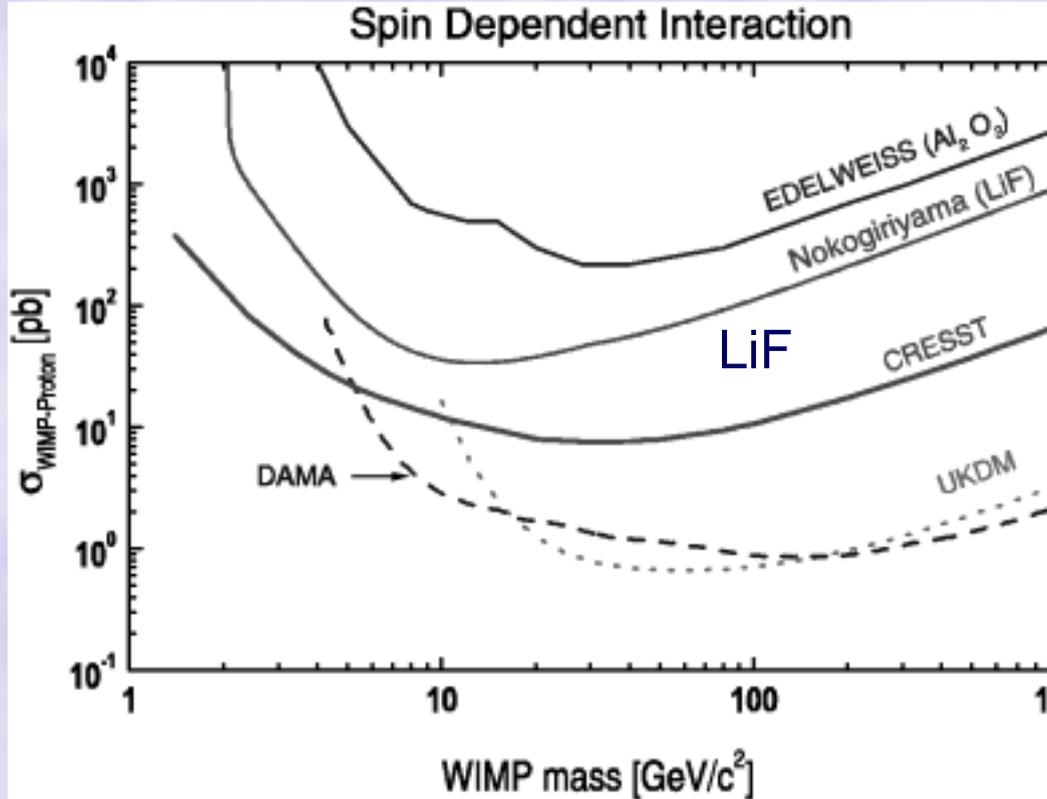
実験名	方法	物質	質量	特徴
H/M (独・露)	電離	Ge	~10 kg	
DAMA (伊)	光	NaI	~ 100 kg	線弁別 (統計的)
CRESST I (独・英)	熱	Al ₂ O ₃	~1 kg	
Tokyo (日)		LiF, NaF	~1 kg	
CDMS (米)	電離 + 熱	Ge, Si	~1 kg	線弁別 (イベント毎)
EDELWEISS (仏)		Ge	~1 kg	
CRESST II (独・英)	熱 + 光	CaWO ₄	~1 kg	
ZEPLIN II (英)	光 + 電離	Xe	~10 kg	
XMASS II (日)		Xe	~10 kg	
DRIFT (英)	電離 (ガス)	CS ₂	~1 kg	

◆ 散乱断面積に対する制限

● ニュートラリーノの質量を決めると断面積の制限がつく。



(Phys. Lett. B **545** (2002) 43)



(Astropart. Phys. **18** (2002) 4)

◆ DAMA's annual modulation signal (Phys. Lett. B **424** (1998) 448)

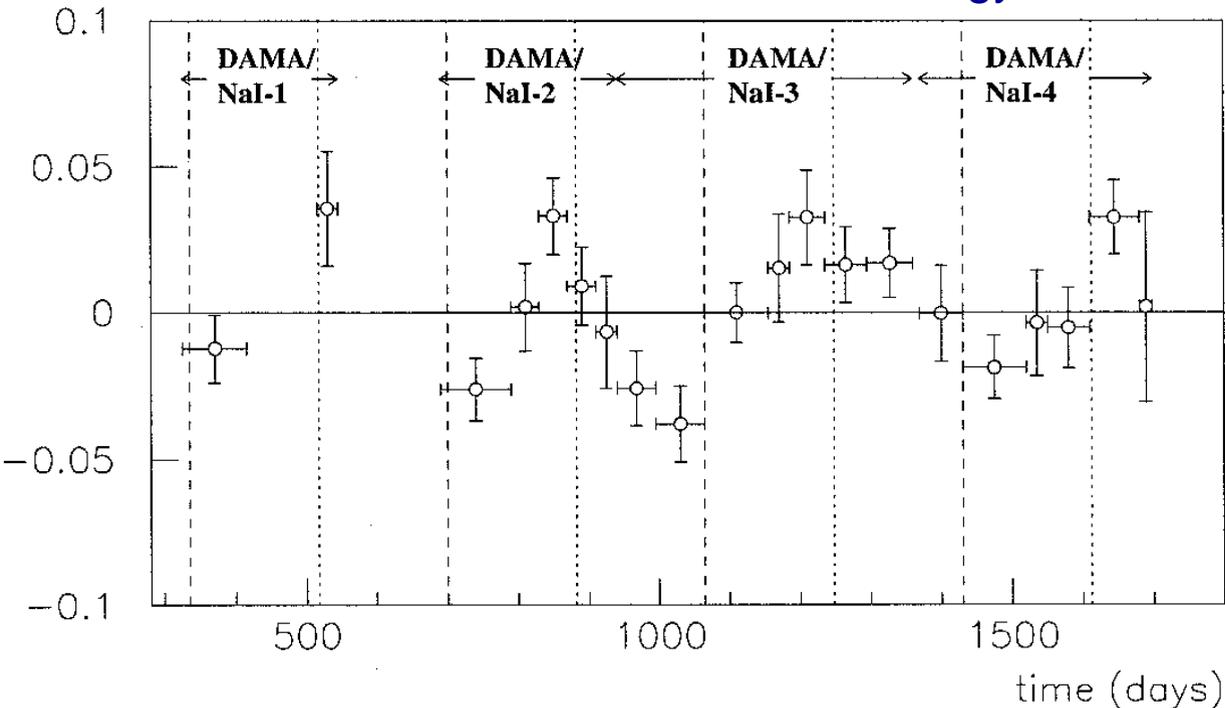
↔ EDELWEISS's exclusion limit (Phys. Lett. B **545** (2002) 43)

◆ 窮地の DAMA/NaI

- 方法としては悪くないんですけどね。

Residual event rates in the 2-6 keV energy interval

PLB 424 (1998) 195
 PLB 450 (1999) 440
 PRD 61 (1999) 023512
 PLB 480 (2000) 23
 PLB 509 (2001) 197
 PRD 66 (2002) 043503



$$S = B + A \cos[\omega(t - t_0)]$$

$$t_0 \sim 150 \text{ days}$$

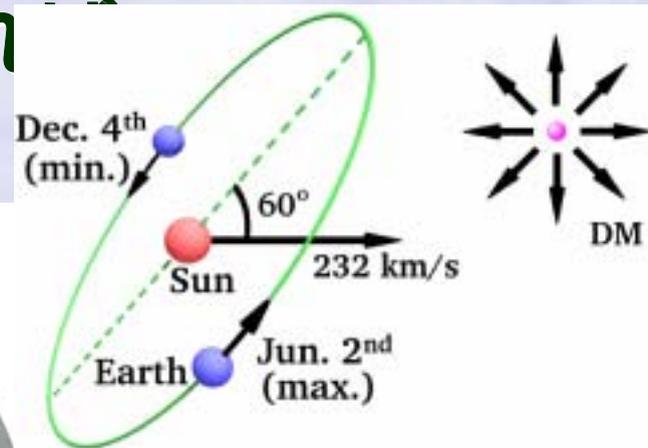
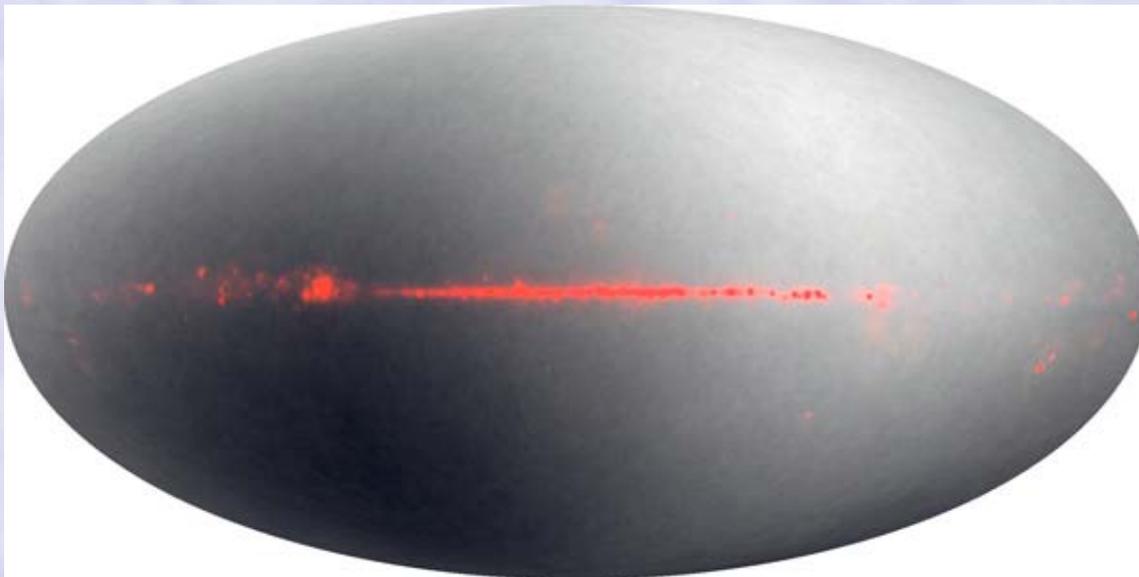
$$T = 2\pi/\omega \sim 1 \text{ years}$$

$$A = (0.022 \pm 0.005) \text{ cpd/kg/keV}$$

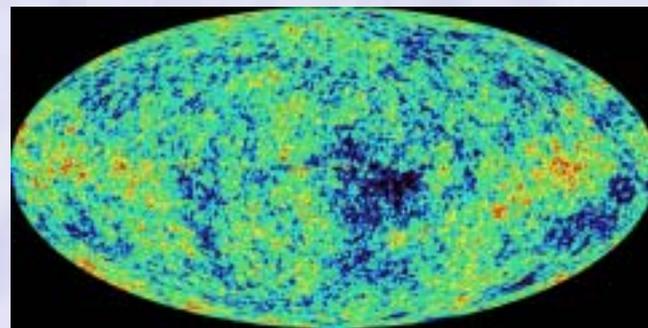
period	kg day
DAMA/NaI-0	4,123
DAMA/NaI-1	4,549
DAMA/NaI-2	14,962
DAMA/NaI-3	22,455
DAMA/NaI-4	16,020
DAMA/NaI-5	15,911
DAMA/NaI-6	16,608
DAMA/NaI-7	17,226
total	107,731

◆ ダークマターの風向きが分かれ

- こんなのが見えて、

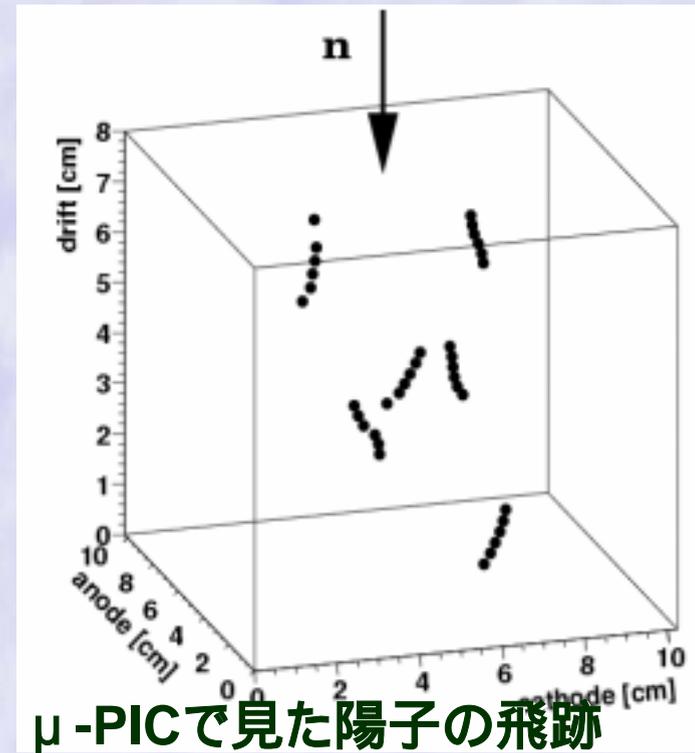
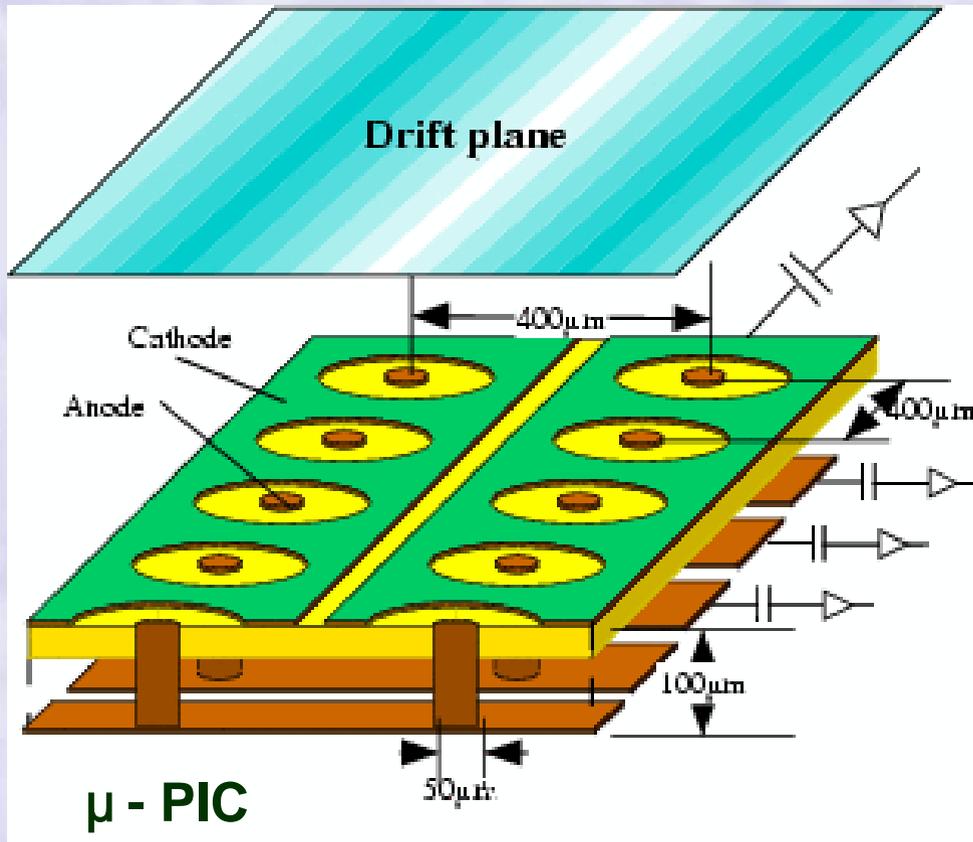
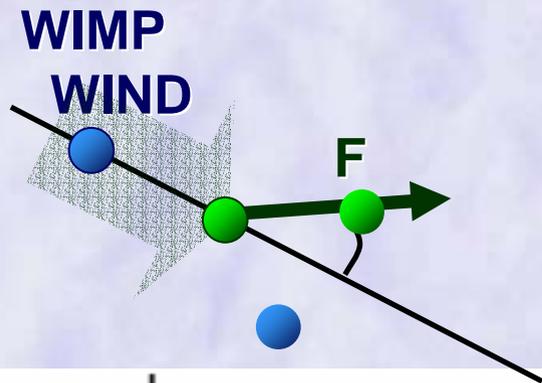


- その先こんなことになるかも？



風向き測定?

- には、ガス検出器です。
- μ -PICならピッチも小(DRIFTは2mm)



- まだ「言ってるだけ」ですけど。 μ -PICの他の応用(X線とか MeV とか中性子とか)していると検出器の性能が上がってって、十分にレベルが上がったら**一気に**やっつけます。

そんなこんなでまとめます。

- ◆ WMAP一年目の結果：
「インフレーション+宇宙定数入りの冷たい暗黒物質モデル」の予言とぴたり一致
- ◆ **CDM 23%**: いろいろな探索実験。
- ◆ 10+?年後には(ラ入り言葉が流行)
「**ニュートラリーノ天文学**の開拓」
目指しますか。

ご清聴ありがとうございました。