

サイエンス・サマースクール  
in やまがた

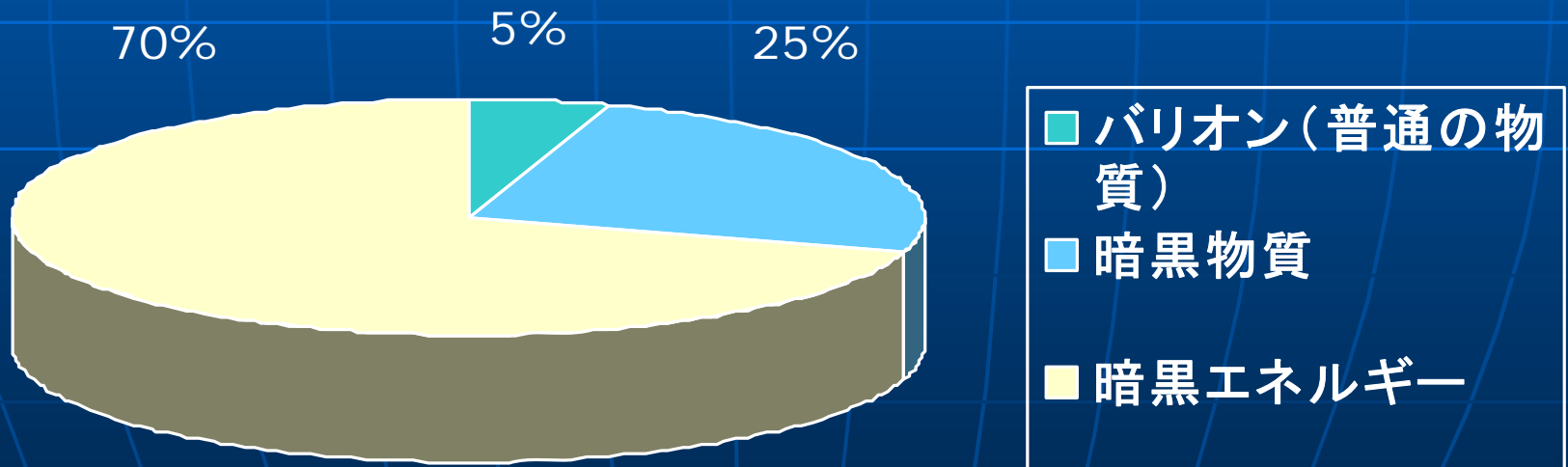
宇宙の不思議を覗いてみよう：  
(宇宙に満ちている暗黒物質 &  
暗黒エネルギー)

滝沢元和

(山形大学理学部物理学科)

# 今日の結論

宇宙に存在する物質やエネルギーは  
ほとんどが正体不明！！！！

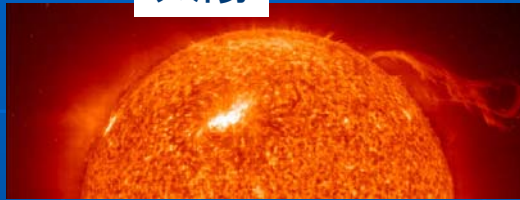


# お品書き

- イン트로ダクション
  - 宇宙の階層構造
  - 暗黒物質とは？
- どれくらい暗黒物質があるのか？
  - 銀河の場合
  - 銀河団の場合
- 暗黒物質の正体は？
- 宇宙膨張と暗黒物質 & 暗黒エネルギー
- まとめ

# 宇宙の階層構造

太陽



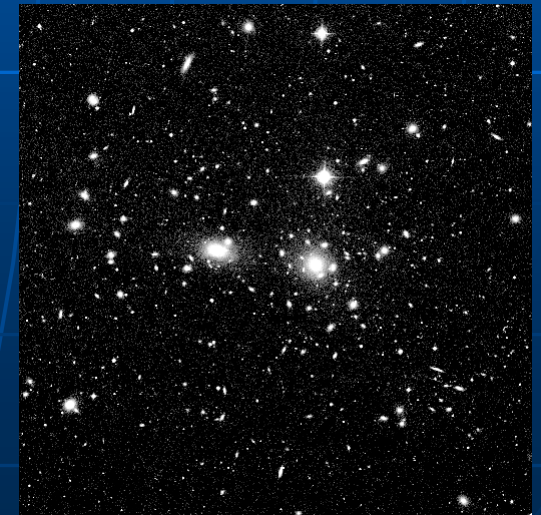
プレアデス星団  
(すばる)



銀河：  
太陽のような星が数千億個  
ぐらい集まった集団



銀河団：  
銀河が数10から数  
100個集まった集  
団

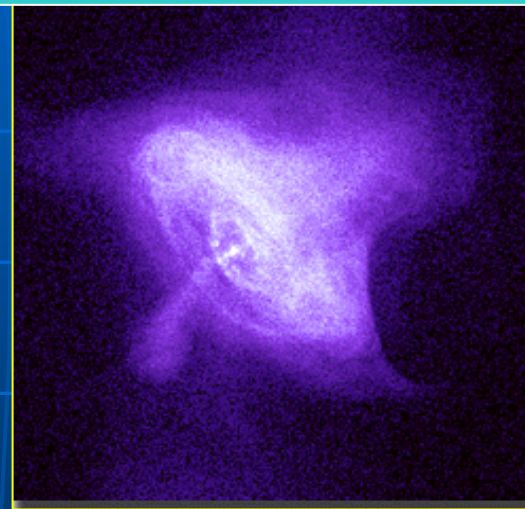


# 宇宙に物質が存在することを 我々はどうやって認識するか？

光で見た銀河



X線で見たカニ星雲



“光る”から(電磁波を放射するから)我々は物質がそこにあることを認識できる。

“光っている”(見えている)ものだけが全てなのか？

# 光っているものが全てなのか？ 明るさ(光の量)と質量を比べて みる



電磁波

望遠鏡で観測  
明るさ:L

何らかの方法

全質量:M

“光らない物質(暗黒物質)”がなければLはMに比例するだろう。

M/L をよくわかっているもの(例:太陽)と比べてみる。

# 暗黒物質

- 1930年代にツビッキーは乙女座銀河団の銀河の運動を調べて質量を評価した。しかしそれは、光って見える銀河の数から予想される質量の10-100倍にもものぼるものだった。
- 上の結果は、光らないが重力の源になる物質があると考えるとうまく説明できる。このような物質を暗黒物質と呼ぶ。



# どうやって質量をはかるか？ (渦巻き銀河の場合)



渦巻き銀河は回転している。

何かの力で中心に向かって  
引っ張っている。==>重力

回転運動==>重力==>質量



M 63 (NGC 5055)

Suprime-Cam (B, V, H $\alpha$ )

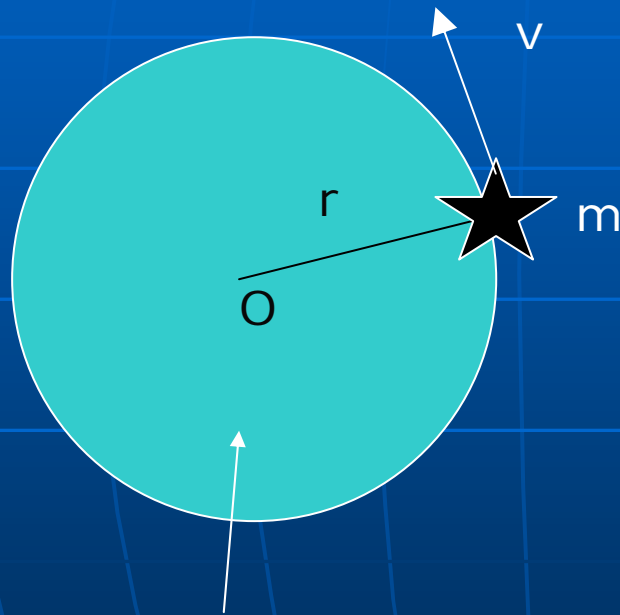
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

June 22, 2000

Copyright© 2000 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved



# ケプラーの法則による質量推定法



$$M(r) = rv^2/G$$

ケプラーの法則による  
渦巻き銀河の質量推定法

点 $O$ を中心として質量 $m$ を持つ天体が  
円運動している。  
円運動の半径 $r$ 、速さ $v$ がわかっているとする  
円内にある(見えていない)全質量 $M(r)$   
はどうしたら求まるか？

重力と遠心力の釣り合いから、

$$mv^2/r = GmM(r)/r^2$$

( $G$ : 重力定数)

したがって

$$M(r) = rv^2/G$$

# ドップラー効果を用いた 天体の運動の測定

遠ざかるときは  
サイレンの音は低くなる



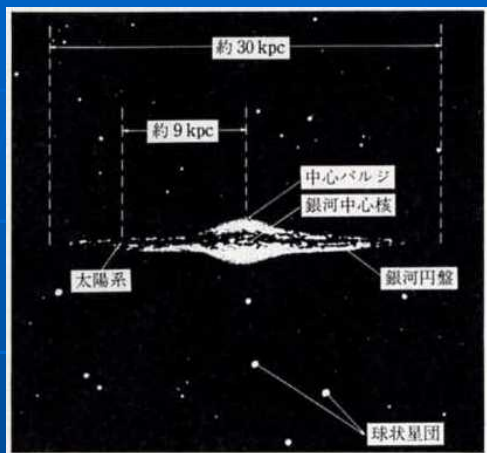
近づくときは  
サイレンの音は高くなる

遠ざかるときは  
光は赤くなる

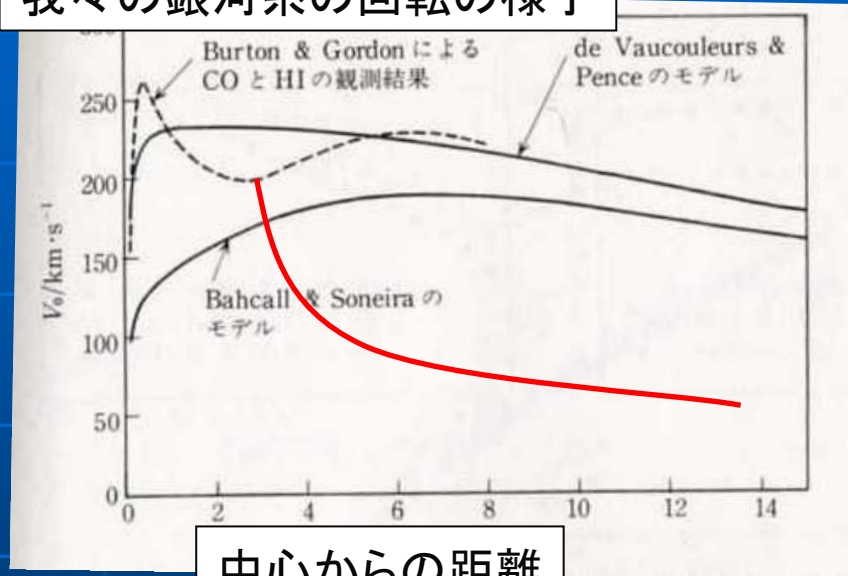


近づくときは  
光は青くなる

# 渦巻き銀河の暗黒物質

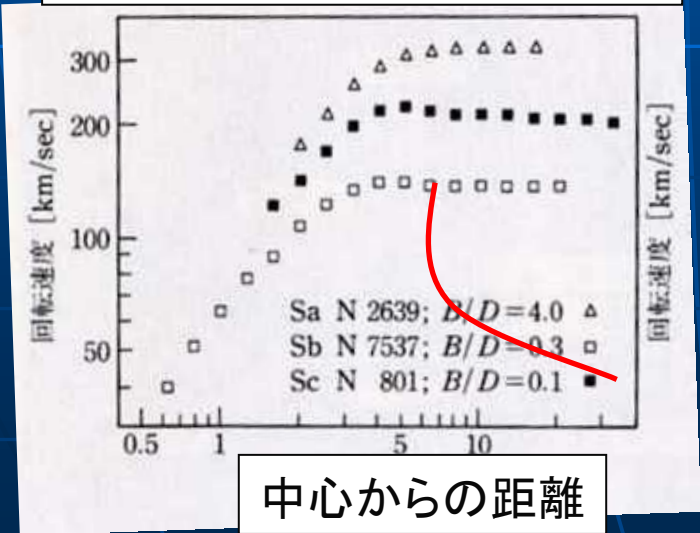


我々の銀河系の回転の様子



中心からの距離

いろいろな銀河の回転の様子



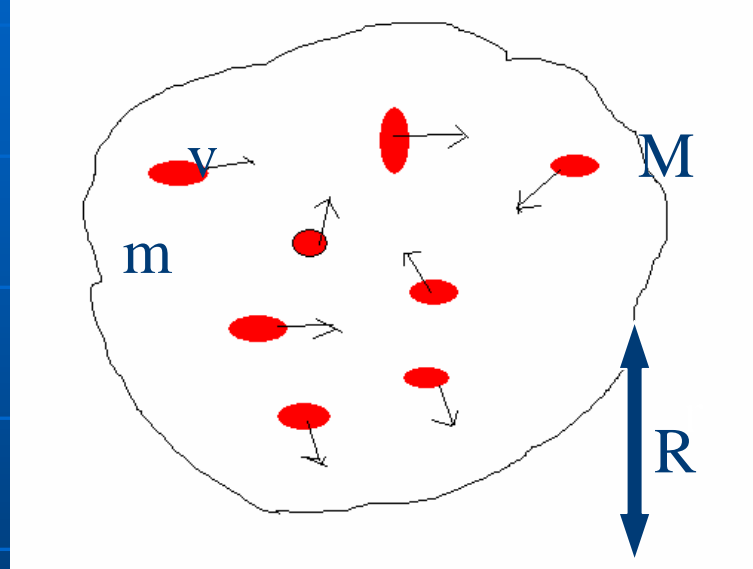
中心からの距離

光っている物質だけを考えると外側では赤線のように回転速度は落ちるはず、、、

だが実際はほぼ一定  
光っている物質の10倍以上の暗黒物質が必要。

# どうやって質量をはかるか？ (銀河団の場合)

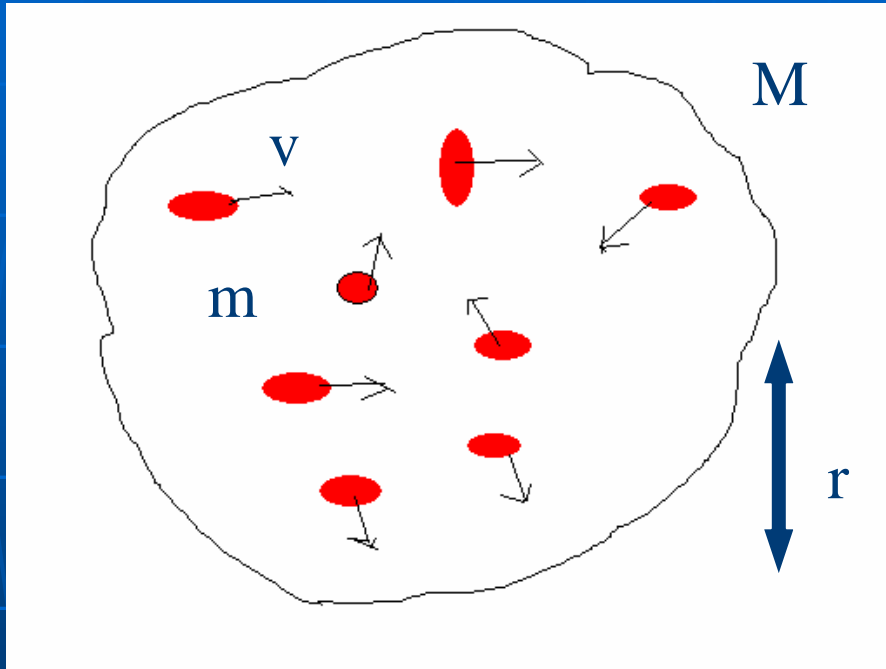
銀河団：銀河が数100から数1000集まった天体



銀河団の中の銀河は動きまわっている。  
そのままではバラバラになってしまい集団にはなり得ない  
何らかの力によって束縛されている==>重力

銀河の運動==>重力==>質量

# ビリアル定理による質量推定法



質量 $m$ の銀河達が、速さ $v$ で半径 $r$ 質量 $M$ の領域を動き回っているとすると、

重力エネルギーと運動エネルギーの釣り合いから(ビリアル定理)、

$$M = \langle r \rangle \langle v^2 \rangle / G$$

(  $\langle \rangle$  は平均をあらわす )

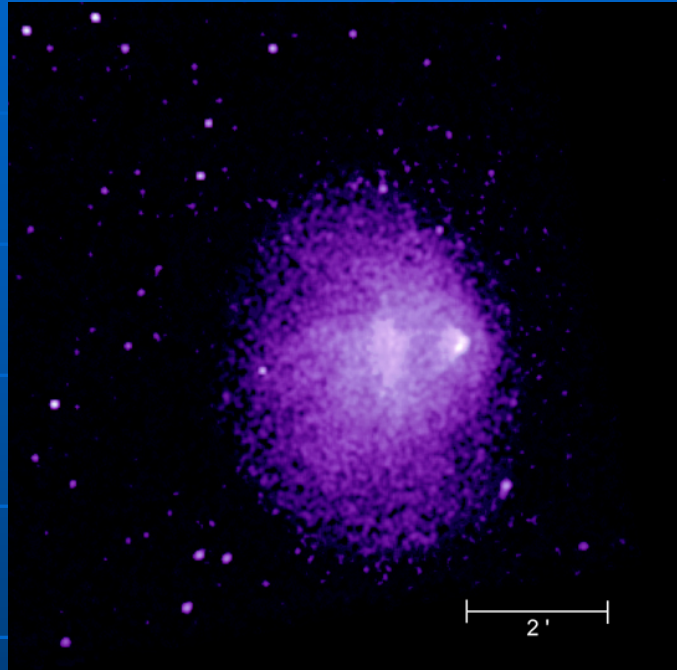
cf. ケプラーの法則を使った場合

$$M(r) = rv^2 / G$$

# 1E0657-56銀河団



可視光イメージ：  
青いシミのように見えるのが  
銀河たち



X線イメージ：  
銀河団全体を覆う高温ガス

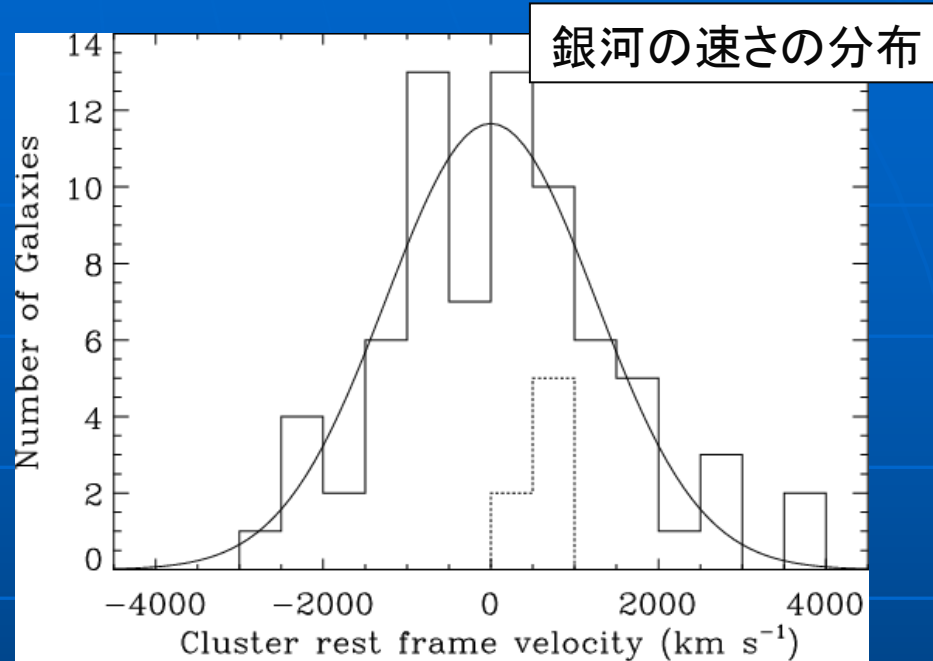
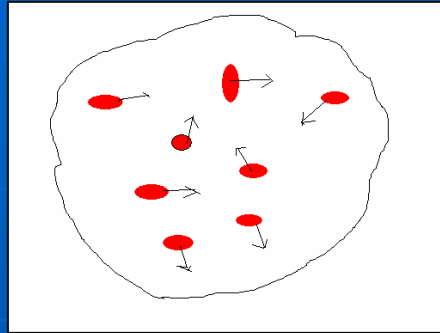
りゅうこつ座の方向(南の空)  
地球からの距離はおよそ45億光年  
この天体の質量は？暗黒物質は必要か？



# 1E0657-56銀河団



可視光イメージ:  
青いシミのように見えるのが銀河たち



$$\langle r \rangle = 4.1 \times 10^{22} \text{m}$$

$$\langle v \rangle = 2697 \text{ km/s}$$

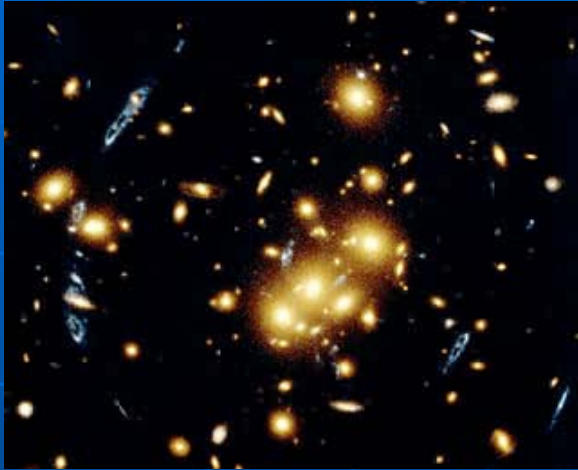
$$\text{総質量 } M = \langle r \rangle \langle v^2 \rangle / G = 1.3 \times 10^{15} M_{\text{太陽}}$$

$$\text{総光度 } L = 6.5 \times 10^{12} L_{\text{太陽}}$$

$$\implies (M/L) = 200 (M/L)_{\text{太陽}}$$

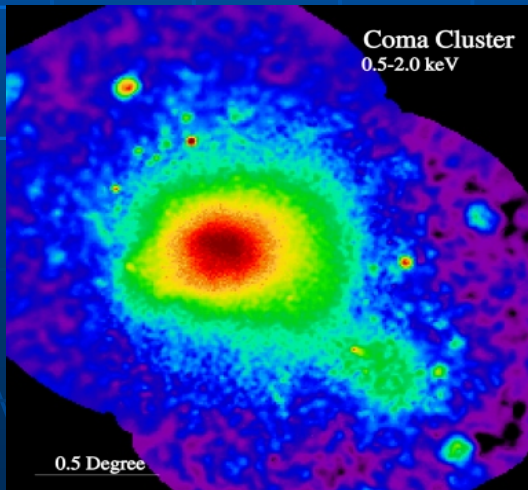
(光っている物質の約200倍の暗黒物質が必要)

# 銀河団の質量をはかる他の方法



## 重力レンズ

背景にある銀河が重力によって曲げられる。曲げられ方は質量で決まる。



## X線イメージ

## 高温ガス(X線で見える)

高温(約1億度)のガスを閉じこめるのに必要な重力を作るだけの質量が必要

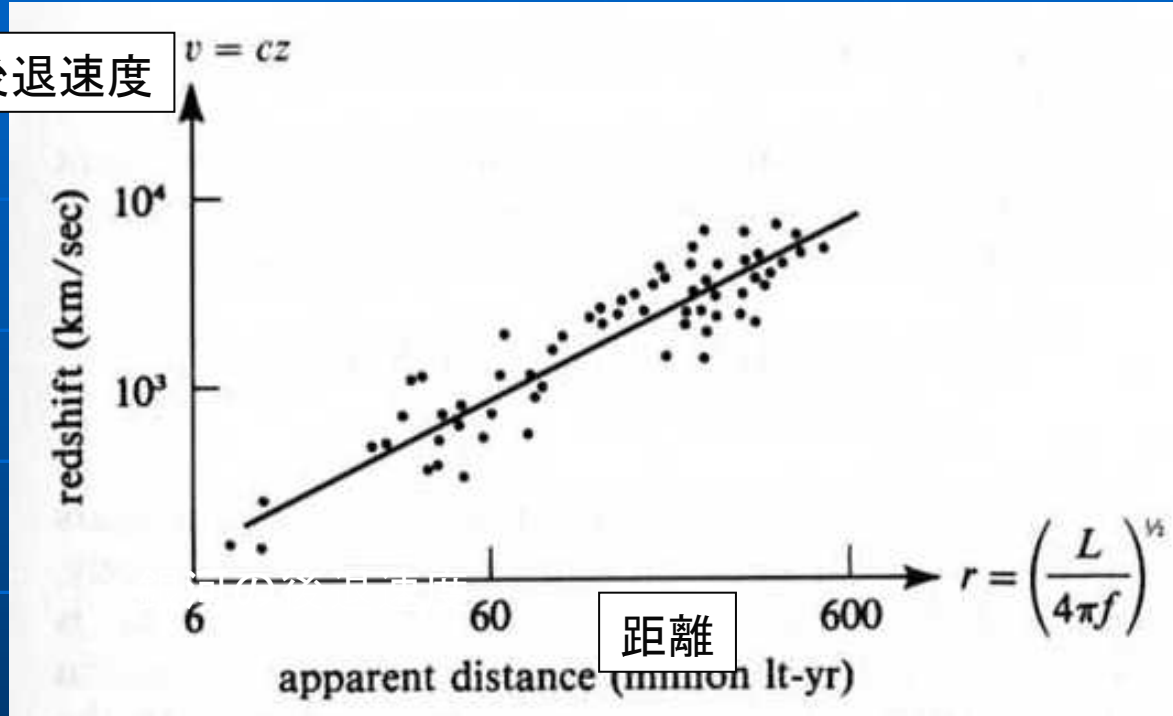
いずれの方法でも $M/L > 100(M/L)_{\text{太陽}}$   
——> 光っている物質の100倍以上の  
暗黒物質が必要

# 暗黒物質の正体

- 現時点では不明。ただしいくつかの候補はある。
  - 冷たい星(巨大な木星)
  - ブラックホール
  - 未知の素粒子(重力相互作用はするが、電磁相互作用はしない)
- 別の可能性(ニュートンの重力法則が長距離ではかわるetc)

# 膨張する宇宙

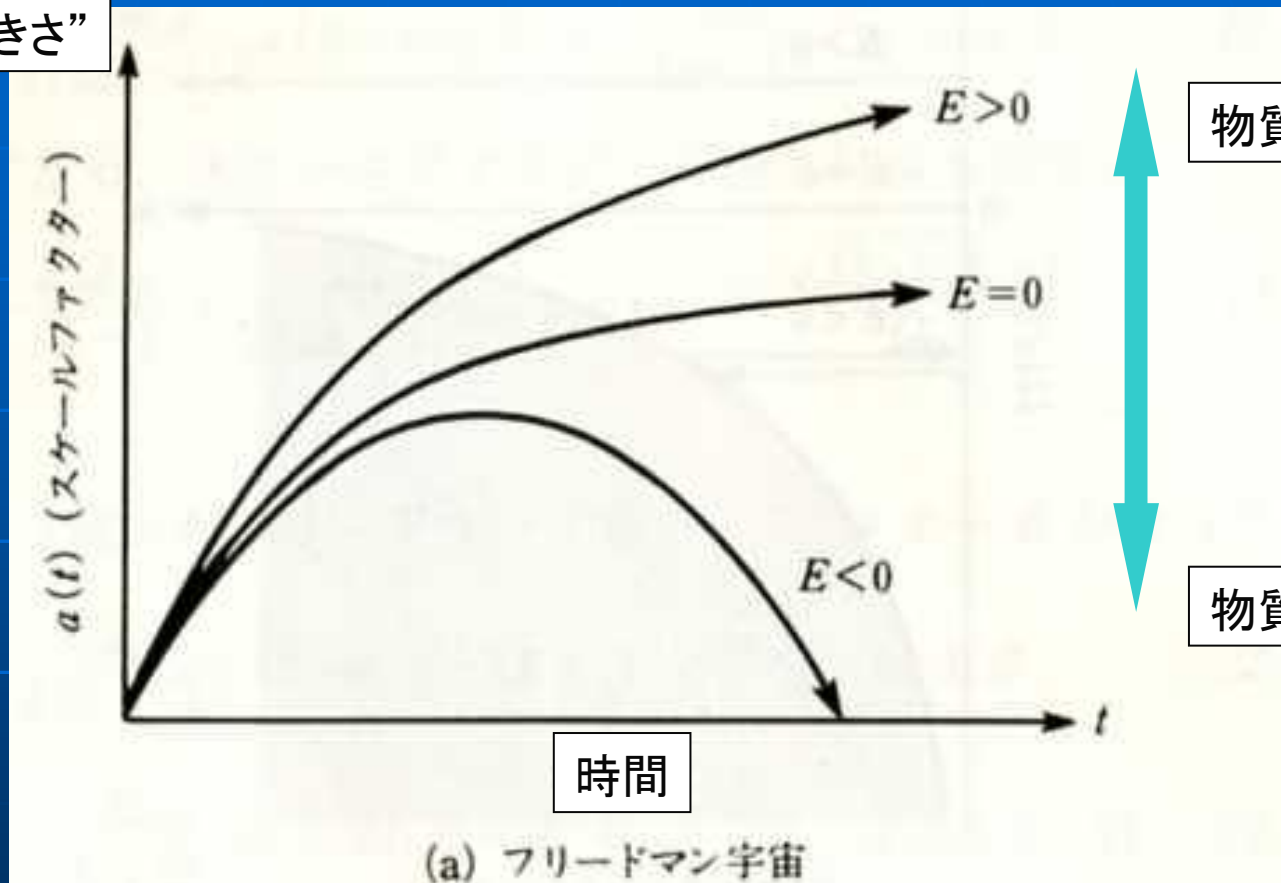
銀河の後退速度



遠くの銀河ほど速く我々から遠ざかっている  
--->宇宙が全体として膨張している。

# 宇宙膨張と暗黒物質

宇宙の“大きさ”



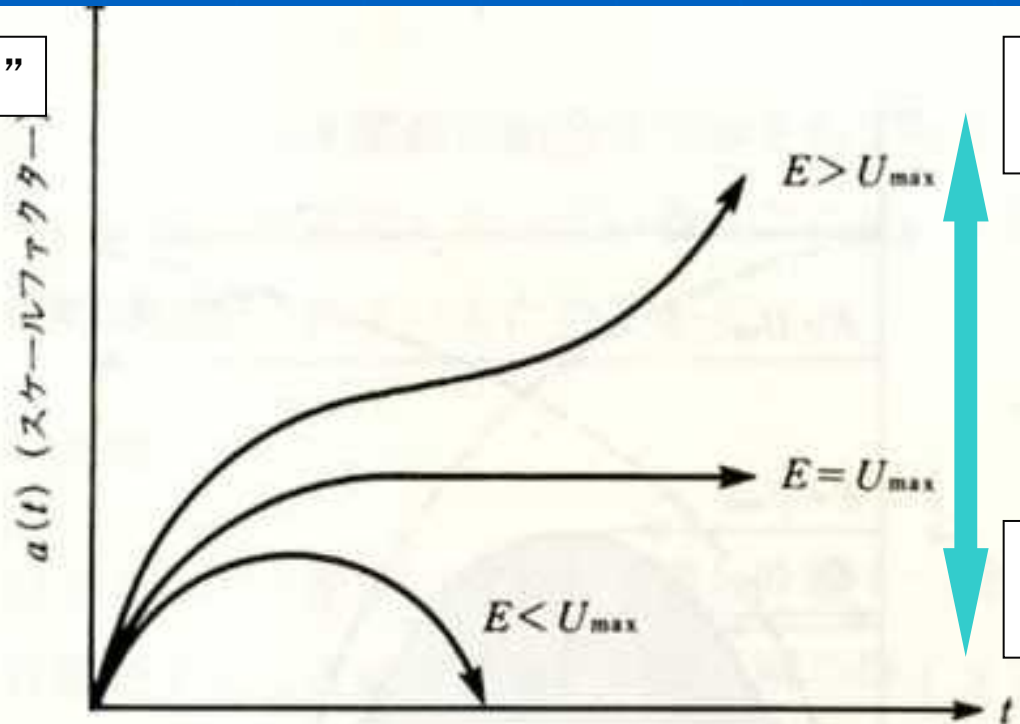
物質が少ない

物質が多い

物質があるとその重力で宇宙膨張はだんだんと遅くなる。  
暗黒物質の量と我々の宇宙の将来には大いに関係が

# 宇宙膨張と 暗黒物質 & 暗黒エネルギー

宇宙の“大きさ”



暗黒エネルギーが多い

暗黒エネルギーが少ない

時間

(b) ルメートル宇宙

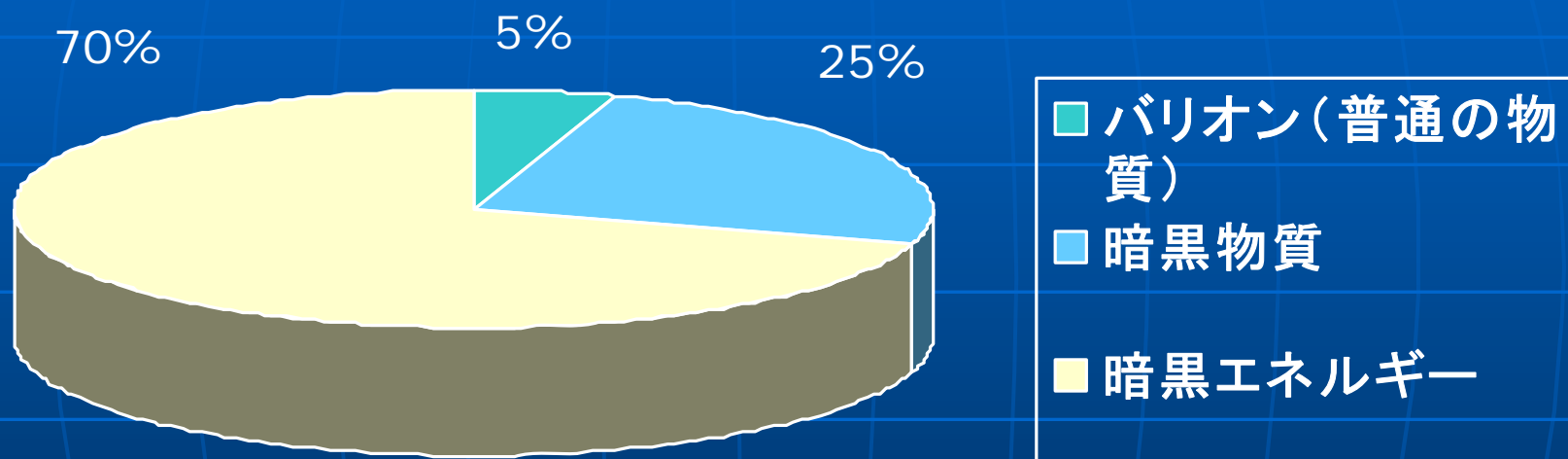
“暗黒エネルギー”による“反発力”があると、  
宇宙膨張はどんどん速くなっていくかも、、、  
(どうも我々の宇宙はそうなっているらしい)



# 暗黒エネルギーの正体

- 真空自体が持っているエネルギー？
- “空間”には反発しようとする性質がある。
- 正体は不明だが、宇宙の振る舞いを説明するためにはないと困る。
  
- 結局よくわからない

# 明らかにになった宇宙の姿



宇宙に存在する物質やエネルギーは  
ほとんどが正体不明！！！！

# まとめ

- 宇宙に物質が存在することを我々は主に電磁波を使って認識してきた。しかしこれでわかるのは光っている物質のみである。
- 天体の運動状態を調べることで、(光っていないのまで含めた)総質量をはかることができる。
- 宇宙には光っている物質の100倍以上の暗黒物質がある。
- 暗黒物質の正体はまだよくわかっていない(暗い星、ブラックホール、未知の素粒子、またはニュートンの重力の法則が長距離ではかわる?)。
- 宇宙の膨張の仕方は暗黒物質や暗黒エネルギーに支配されている。
  - バリオン(普通の物質) 5%
  - 暗黒物質 25%
  - 暗黒エネルギー 70%
- 宇宙のほとんどは正体不明