

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)

お品書き

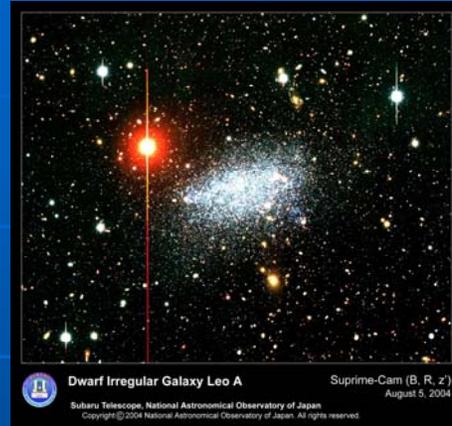
- イン트로ダクション
 - 宇宙の階層構造
 - 暗黒物質とは？
- どれくらい暗黒物質があるのか？
 - 銀河の場合
 - 銀河団の場合
- 暗黒物質の正体は？
- 宇宙膨張
- 暗黒物質 & 暗黒エネルギー
- 重力レンズ
- まとめ

宇宙の階層構造

太陽

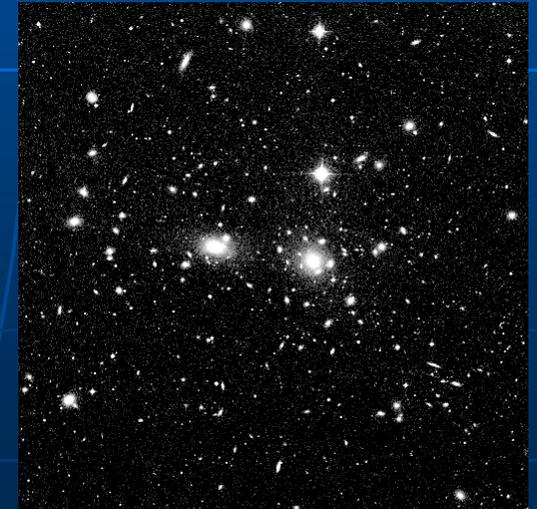


プレアデス星団
(すばる)

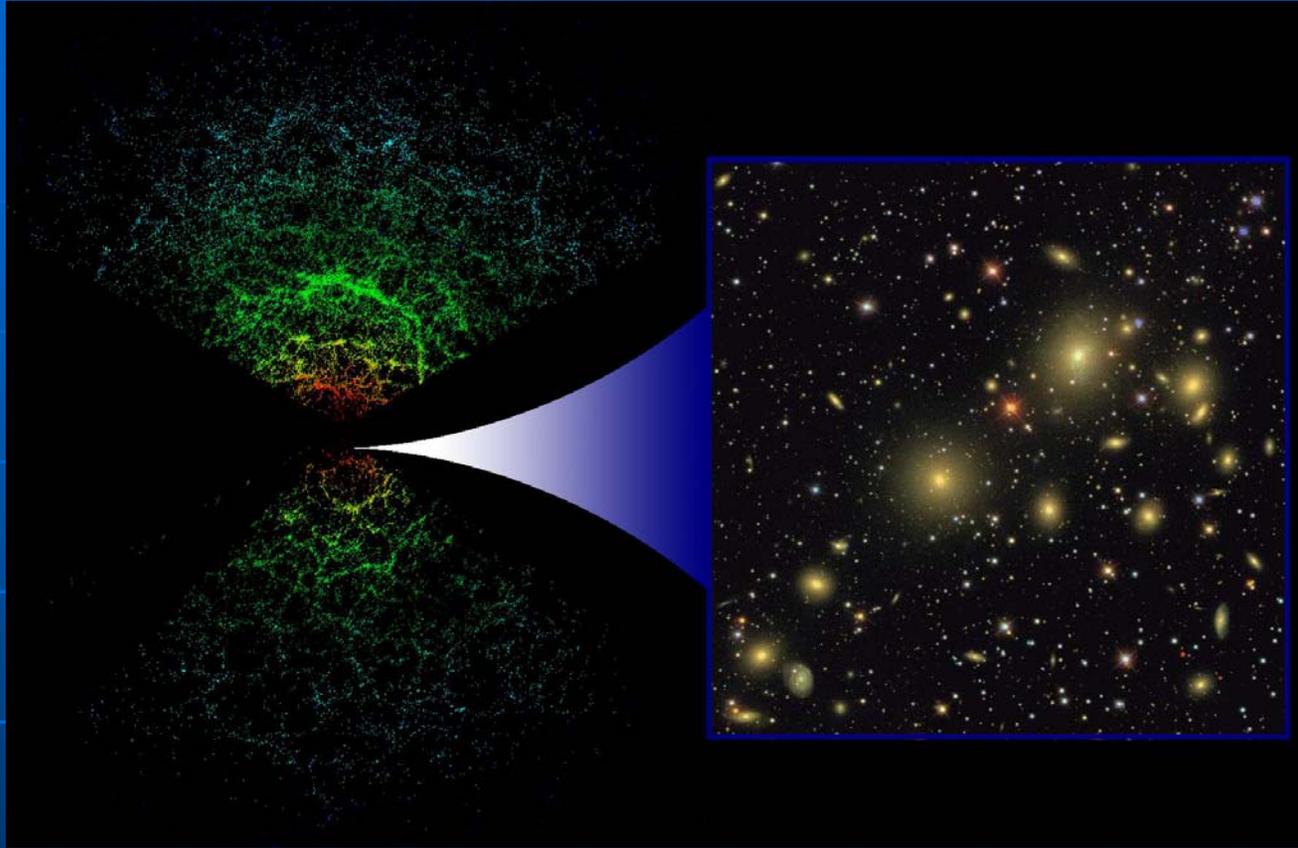


銀河：
太陽のような星が数千億個
ぐらい集まった集団

銀河団：
銀河が数10から数
100個集まった集
団



銀河はたくさんある。



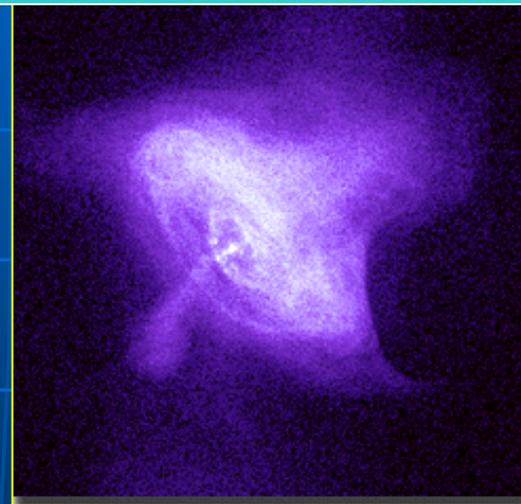
- 銀河の地図
- 細かい点の一個一個が天の川と同じ銀河です。
- 銀河(点)がたくさん集まっているところが銀河団です。
- 銀河(点)が壁のようにあつまっていたり、ほとんどないところもあります

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
(明るさ10倍なら質量も10倍)。

(質量)/(明るさ) 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)

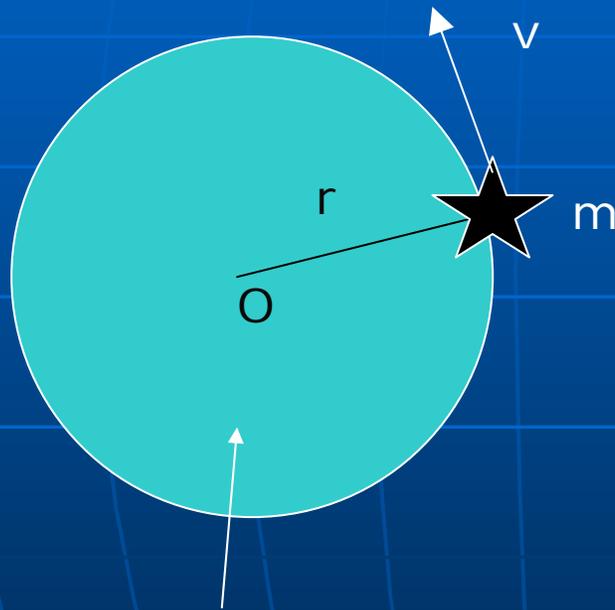
Suprime-Cam (B, V, H α)

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
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

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



速く回転させるには大きな重力が必要
→大量の物質が必要

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



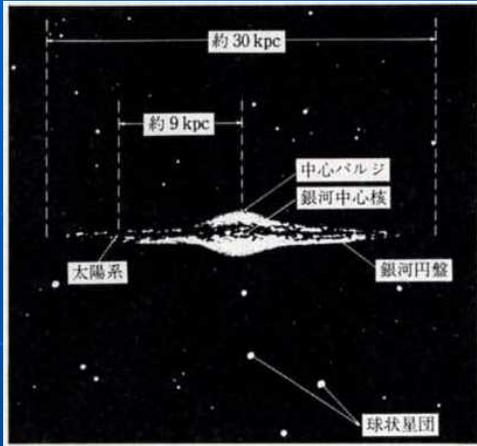
近づくときは
サイレンの音は高くなる

遠ざかるときは
光は赤くなる

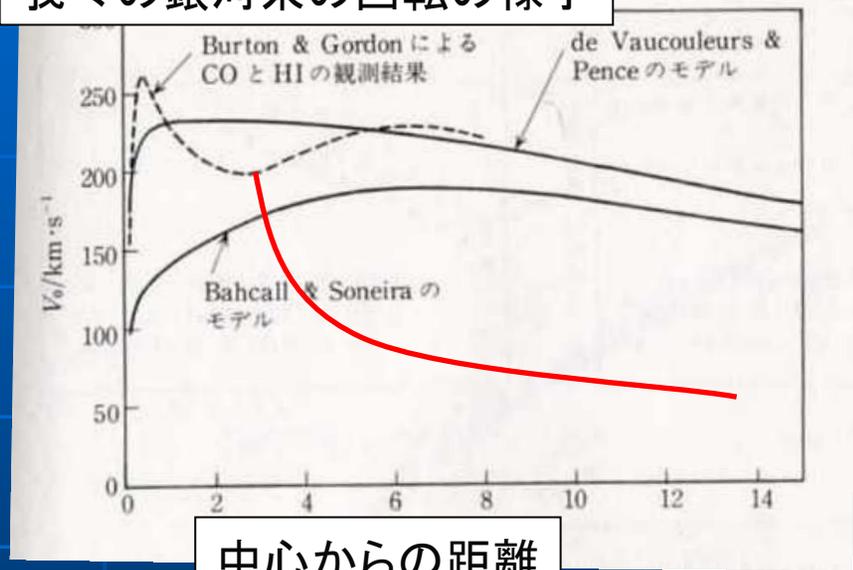


近づくときは
光は青くなる

渦巻き銀河の暗黒物質

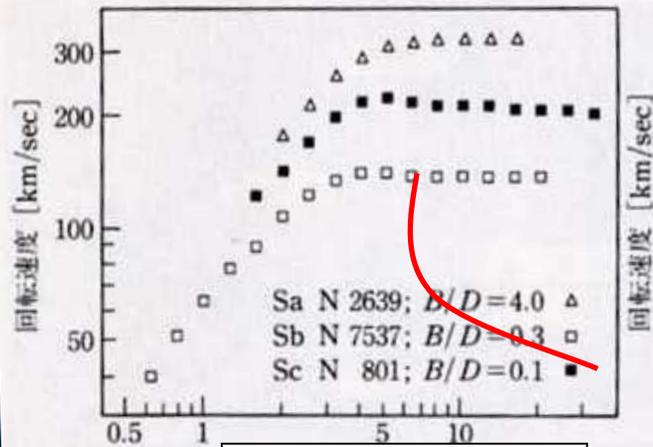


我々の銀河系の回転の様子



中心からの距離

いろいろな銀河の回転の様子



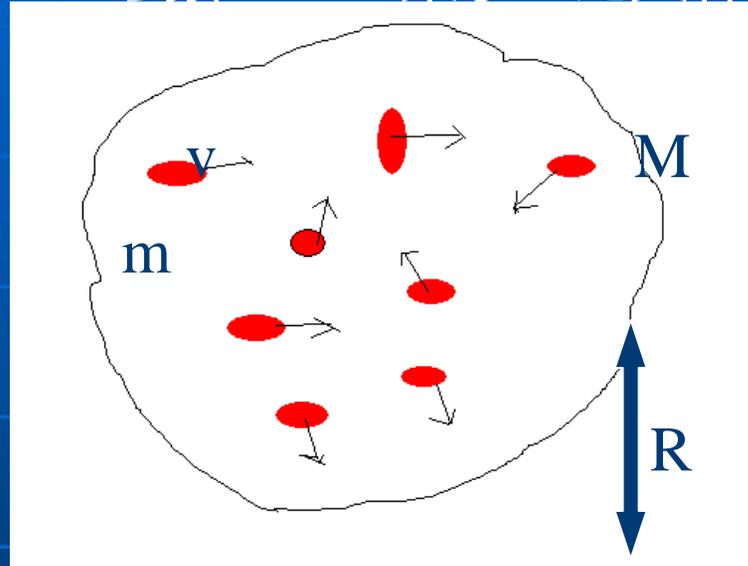
中心からの距離

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、その1)

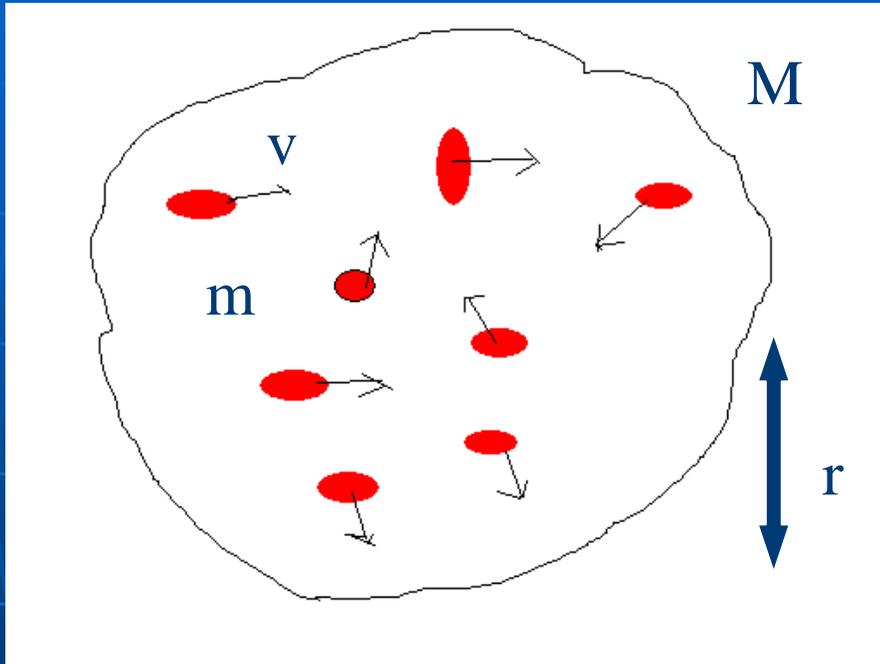
銀河団：銀河が数100から数1000集まった天体



銀河団の中の銀河でたらめな方向に動きまわっている。
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)

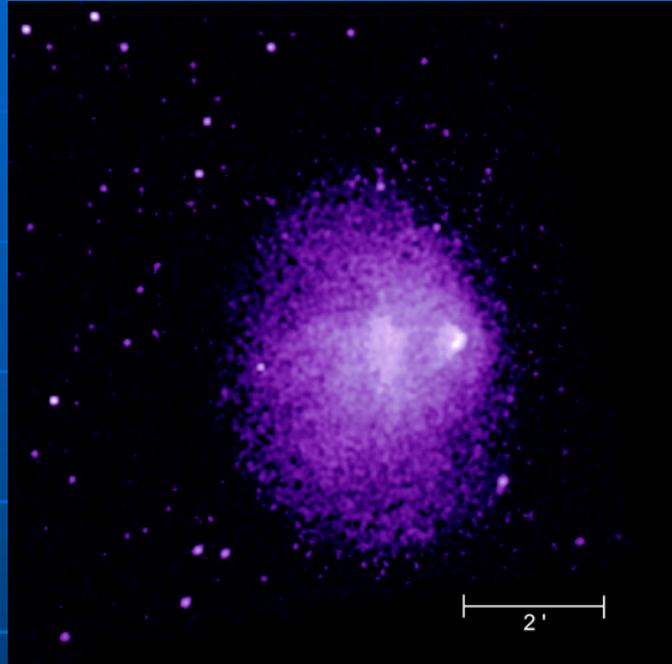
cf. ケプラーの法則を使った場合
 $M(r) = rv^2 / G$

やっぱり、速く動くものを閉じこめておくには強い重力が必要→大量の質量が必要

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



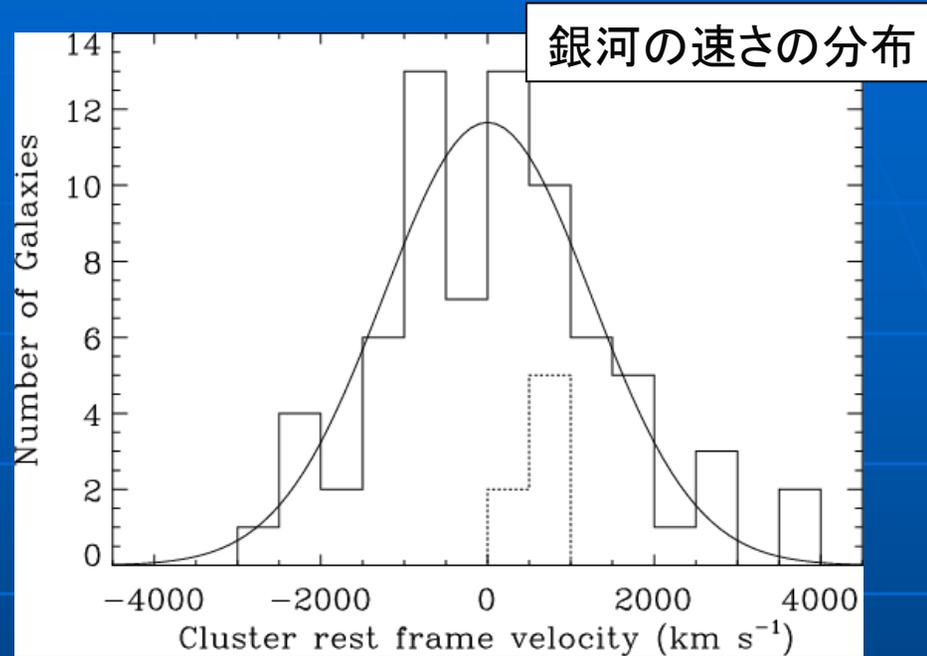
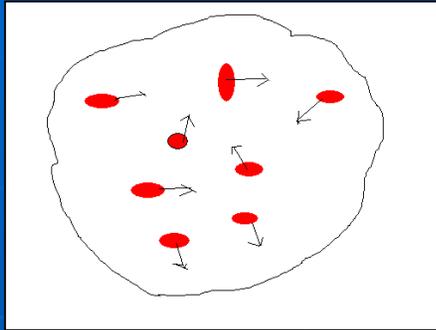
X線イメージ：
銀河団全体を覆う高温ガス

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)

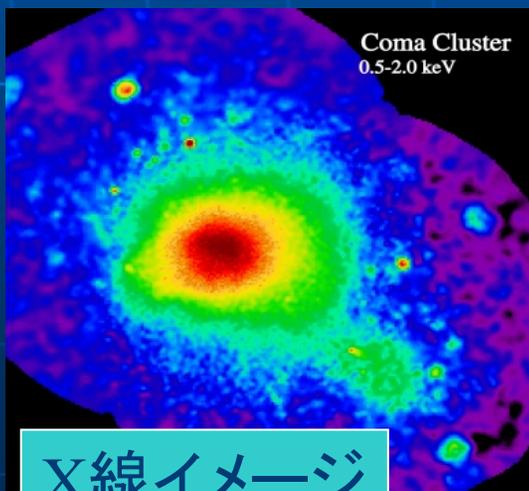
質量をはかる別のやり方： 高温ガスを使う



光(銀河)

銀河団には銀河だけでなく高温ガスもある。
光では見えないがX線で見える。
(実は銀河よりもたくさんある。)

高温(約1億度)のガスはそのままだと
蒸発してしまう(沸騰しているやかんと同じ)。
何かの力(重力)で閉じこめている。



X線イメージ

高温のガスを閉じこめるには
強い重力が必要→大量の質量が必要

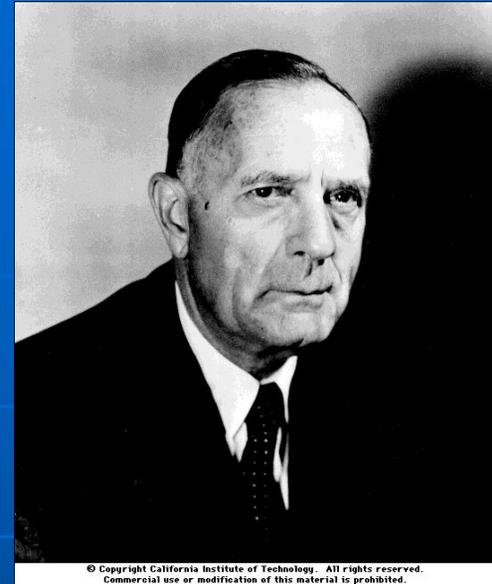
この方法でも $M/L > 100(M/L)_{\text{太陽}}$
——>光っている物質の10倍以上の
暗黒物質が必要

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。
 - 普通の物質でできた暗い天体(ただし難しそう)
 - 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)→21世紀の宿題
- 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)。ただし分布の違いまで説明するのは難しい。

ハッブルの奇妙な発見

たくさんの銀河の運動を観測していた
ハッブルはある奇妙なことに気がついた。



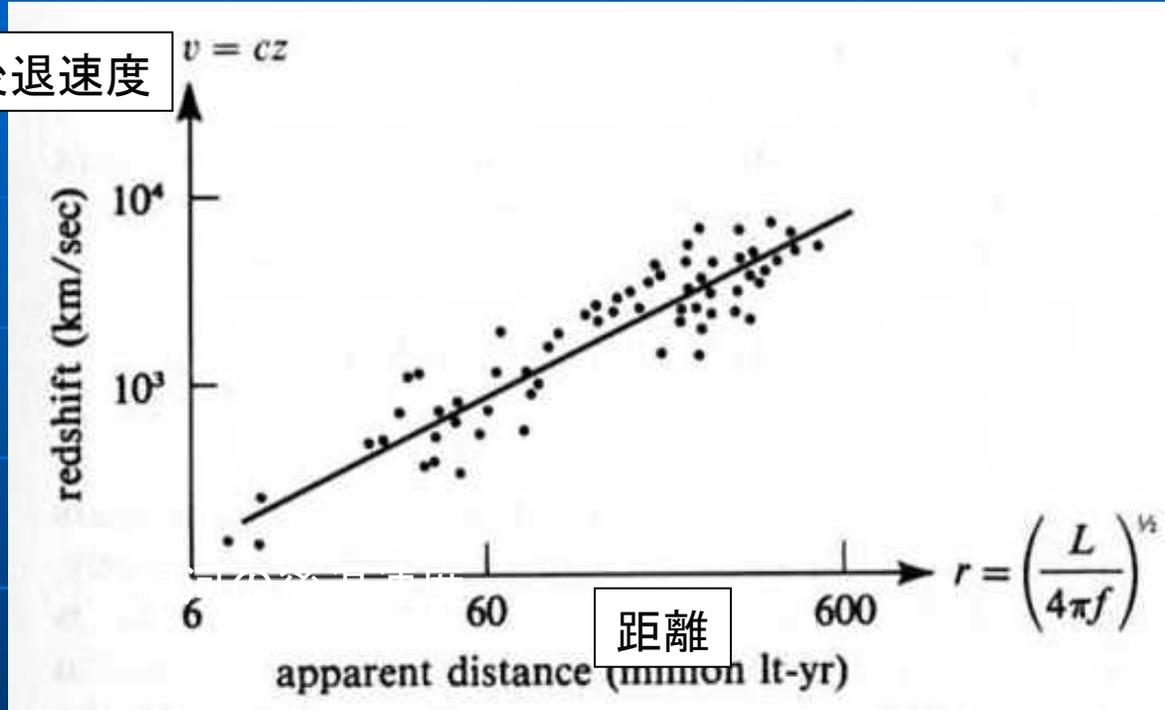
© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

ほとんどすべての銀河は我々から遠ざかっている。
暗い(多分遠くにある)銀河ほど速く遠ざかっている。

いったいなぜ??

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。

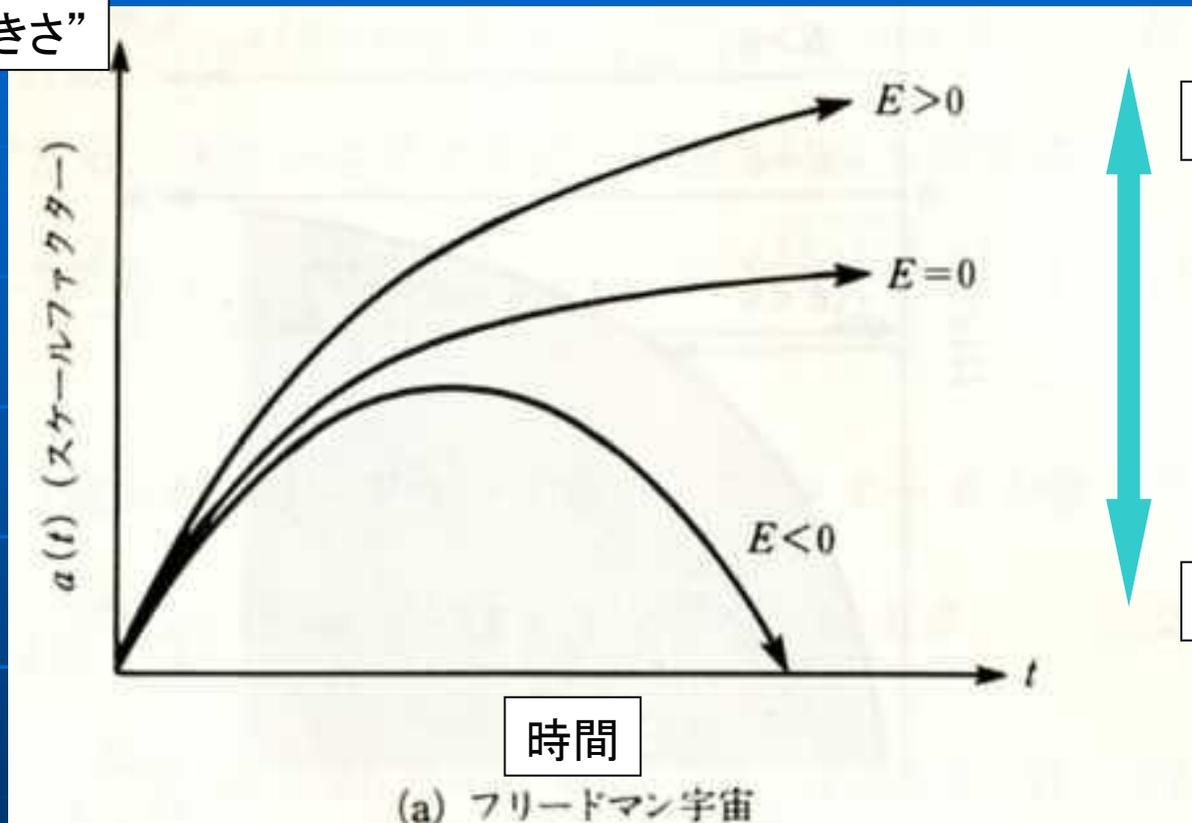
宇宙膨張とボール投げ

- 宇宙は大爆発(ビッグバン)からはじまった。
- 最初の爆発の勢いvs重力
 - 最初の爆発は膨張させる方に
 - 重力は膨張を止める方にはたらく
- 最終的にどちらが勝つのか？
- 重力の強さ(物の量)が大事
 - 月でボールを投げたら遠くまで投げやすい



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

時間

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。
十分に物質があれば最終的には宇宙は収縮に転じる
宇宙の物質のほとんどは暗黒物質
---> 暗黒物質の量と我々の宇宙の将来を決める。

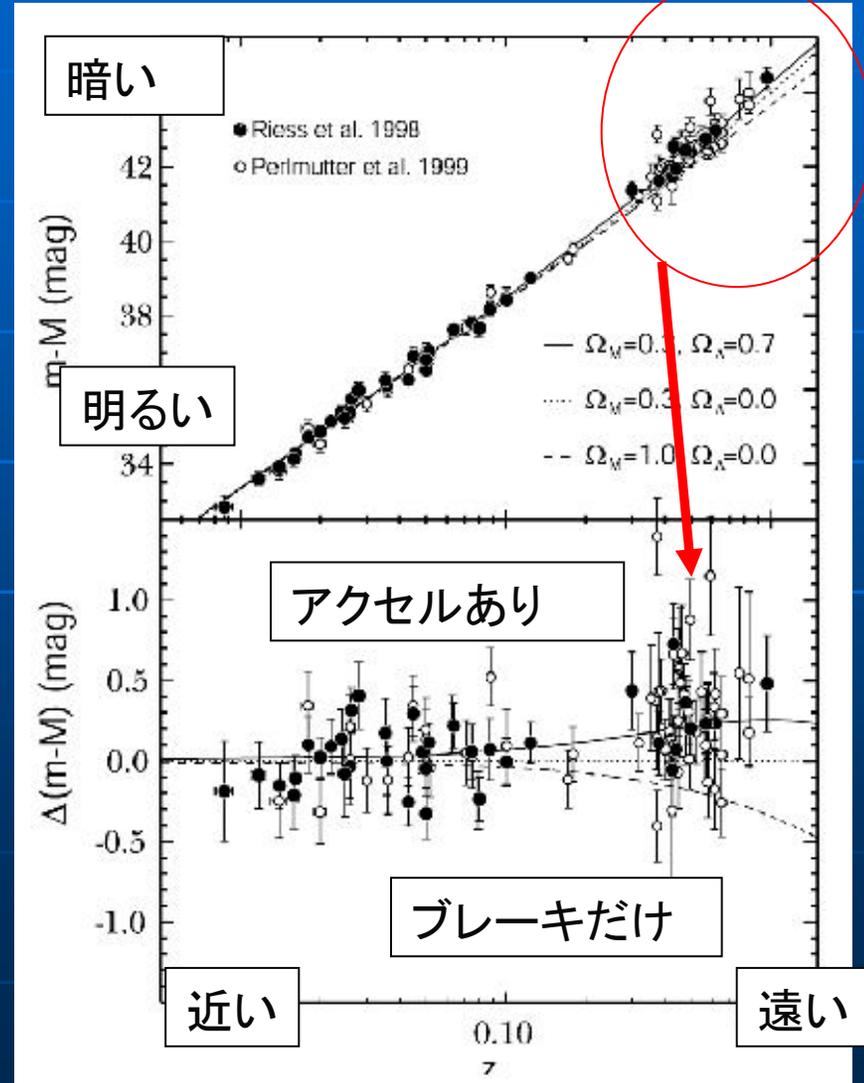
宇宙膨張とロケット

- さっきまでの話は
 - 最初の一撃(ビッグバン)
 - ブレーキ(重力)
- アクセルはないの？
 - 途中で膨張が速くなったりすることはないの？
- エンジン付きの“ボール”



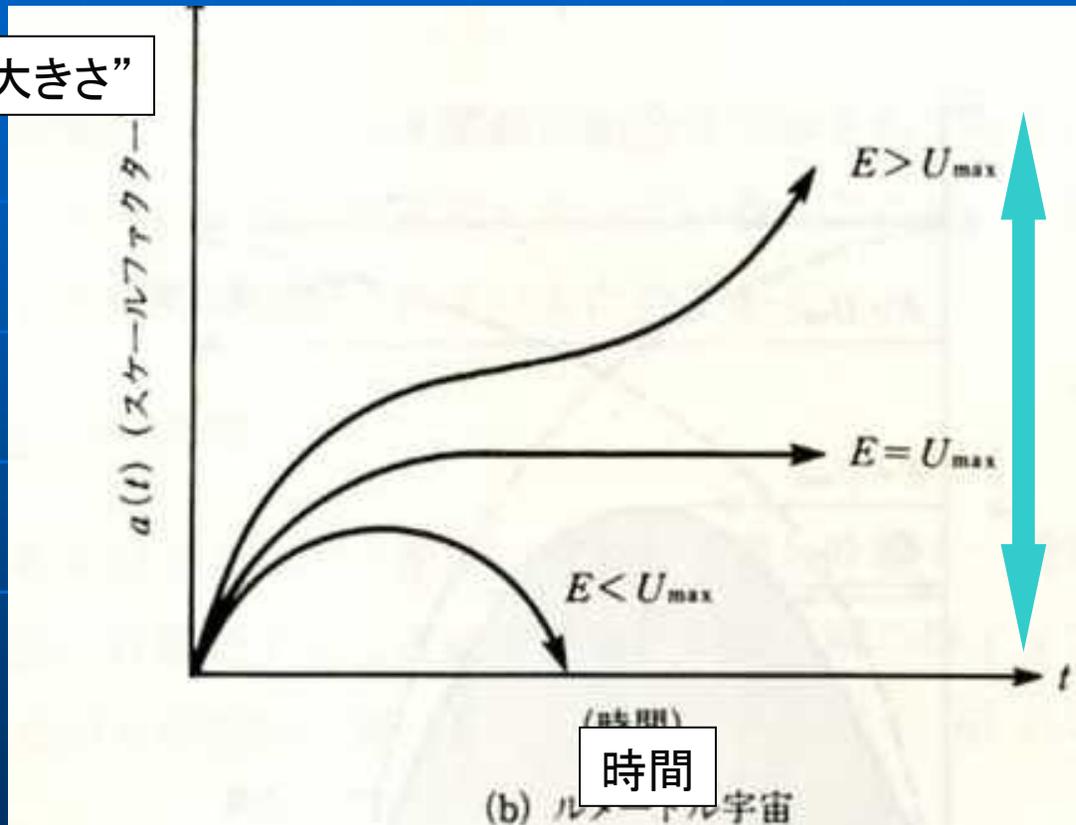
アクセルもあるらしい (暗黒エネルギー)

- 遠くを見ること→昔を見ること
- 遠くの宇宙を見ることで昔の宇宙膨張の様子がわかる。
- 超新星(星の最後の大爆発)を遠くまで見てみた。
- 遠くの超新星は思ったより暗い、、、
- どうも昔より今のほうがはやく膨張しているみたい。
- アクセルは何? →空間の持つエネルギー(暗黒エネルギー)



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

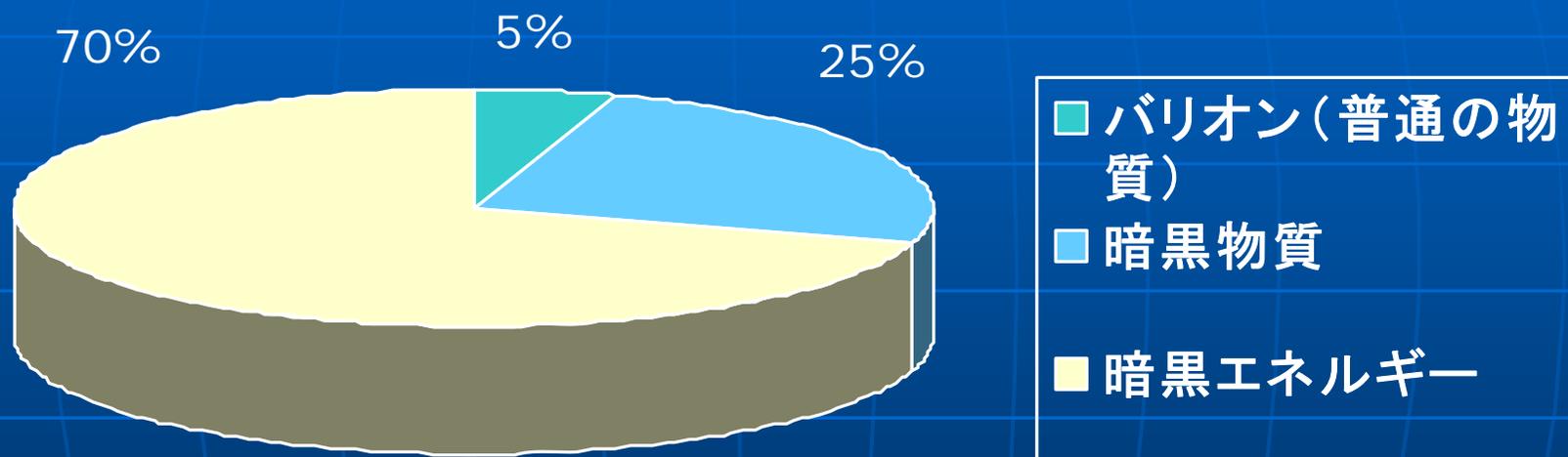
時間

“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。
(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
 - 我々が信じている物理法則がまだ完全でないのかもしれない→21世紀の宿題

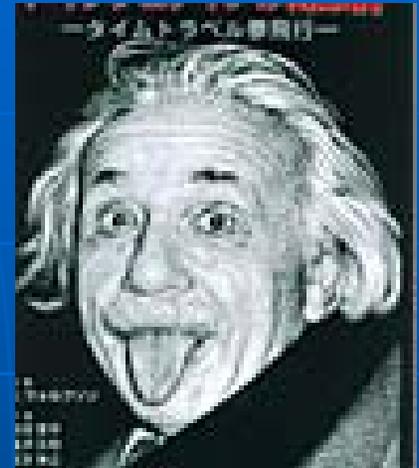
明らかにになった宇宙の姿



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！！！！

見えない物質を見る：重力レンズ

アインシュタインの一般相対論によると、重力とは時間空間のゆがみである。その結果、光も重力によって曲げられる。
重たい天体があたかもレンズのような役割をする（重力レンズ）



遠くにある天体

レンズ天体

観測者

質量をはかるさらに他の方法 (重力レンズ)

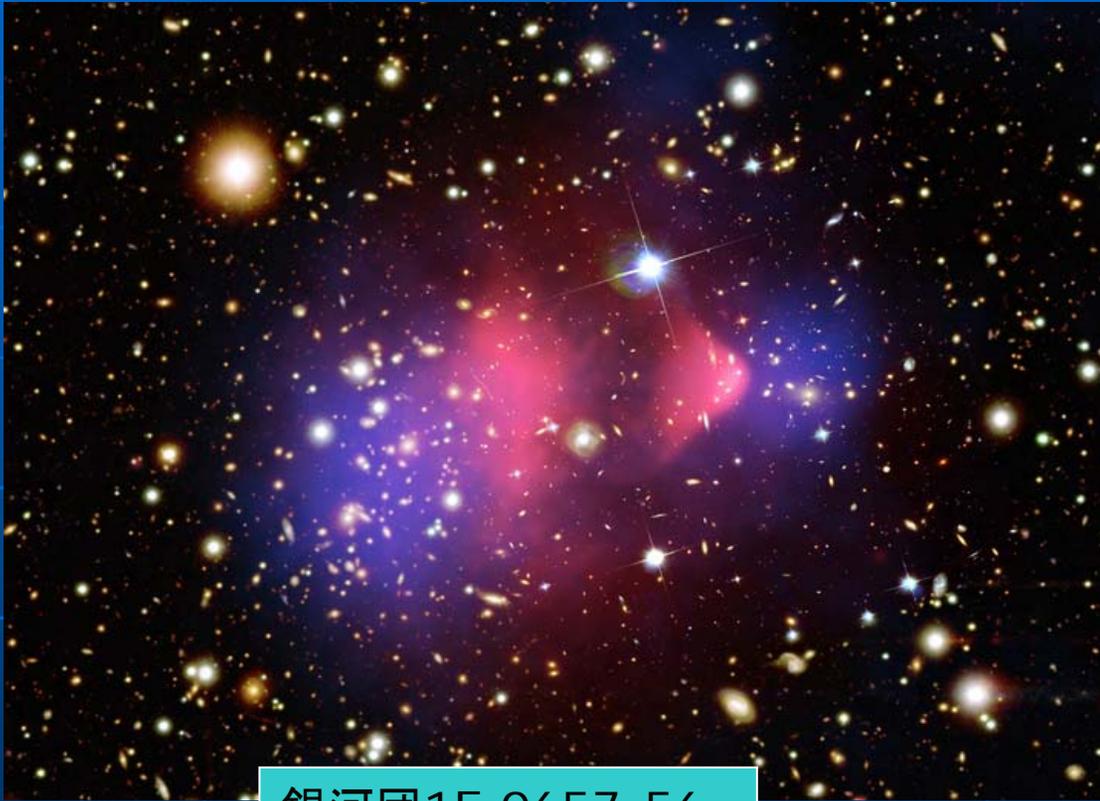


背景にある銀河が重力によって曲げられる。曲げられ方は質量で決まる。

詳しく調べることで暗黒物質の量がわかる

やっぱり光っている物質の10倍程度の質量が必要

重力レンズで暗黒物質を見る

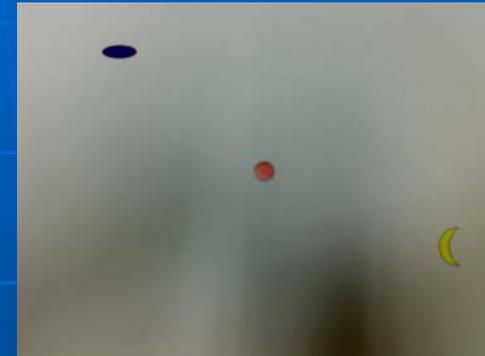
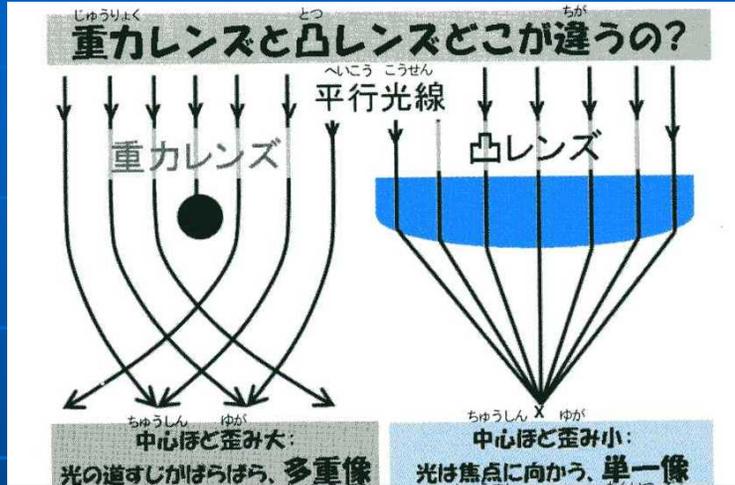


銀河団1E 0657-56。
高温ガス(ピンク)と
暗黒物質の分布(青)

高温ガス(光っている物質)と
暗黒物質で分布の様子が違う

光っていない場所に物がある。

「重カレンズ」レンズ



お手元の紙とレンズ
でしばし遊んでみて
ください

まとめ

- 宇宙に物質が存在することを我々は主に電磁波(光、電波、X線など)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。
- 様々な方法(天体の運動状態、高温ガスの様子、重力レンズなど)を使って、(光っていないのまで含めた)天体の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10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」ということがわかってきた。