

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

第一部：暗黒の宇宙を探る重力レンズ

第二部：宇宙を支配する暗黒物質 & 暗黒エネルギー

滝沢元和

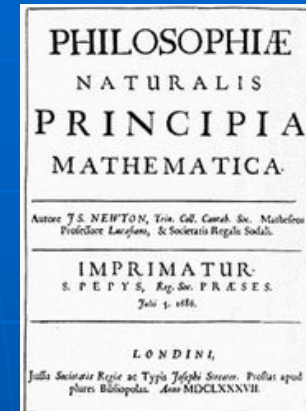
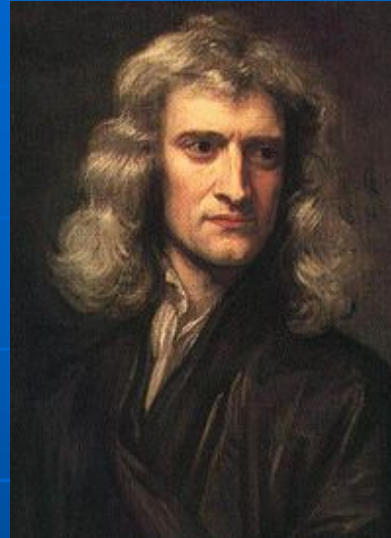
(山形大学理学部物理学科)

# 第一部：暗黒の宇宙を探る重力レンズ お品書き

- 重力とは？
- 光が曲がる（重力レンズの簡単な歴史）
- 宇宙をさぐる道具としての重力レンズ
- 山形大学でも研究しています
- 「重力レンズ」レンズ

# 重力とは？（ニュートンの考え）

- 古典力学（ニュートン力学）では“質量”をもつ物体同士の間にはたらく“力”
- “重たい”物体のそばを通ると重力という力に引っ張られて曲げられる。
- 「引力」

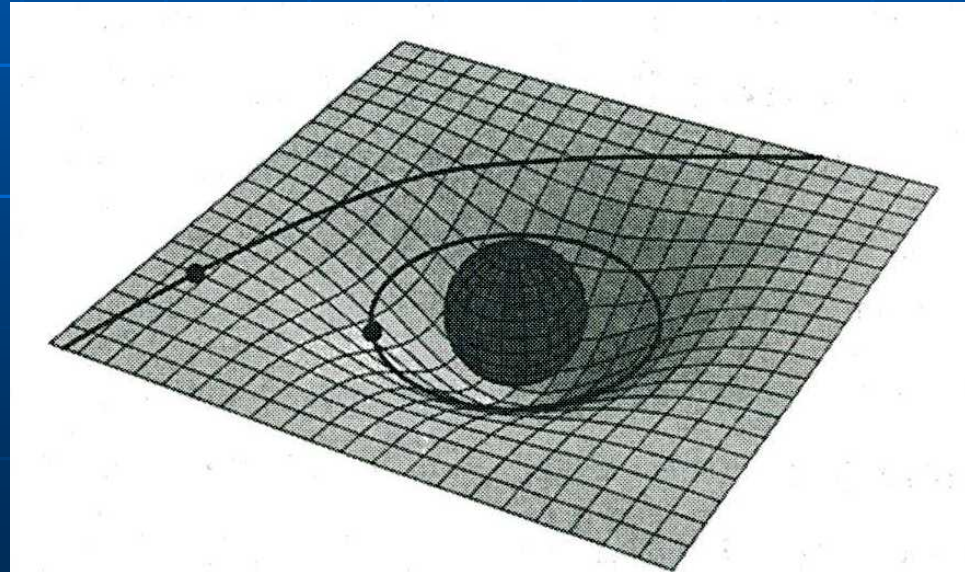
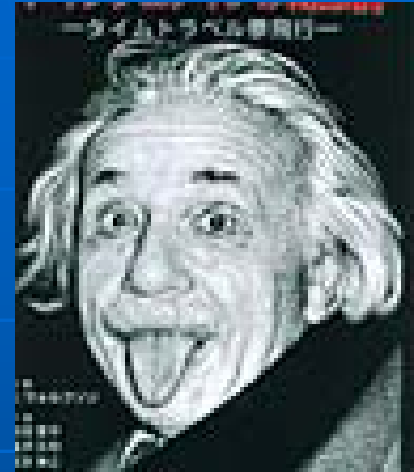


自然哲学の数学的諸原理(1687)



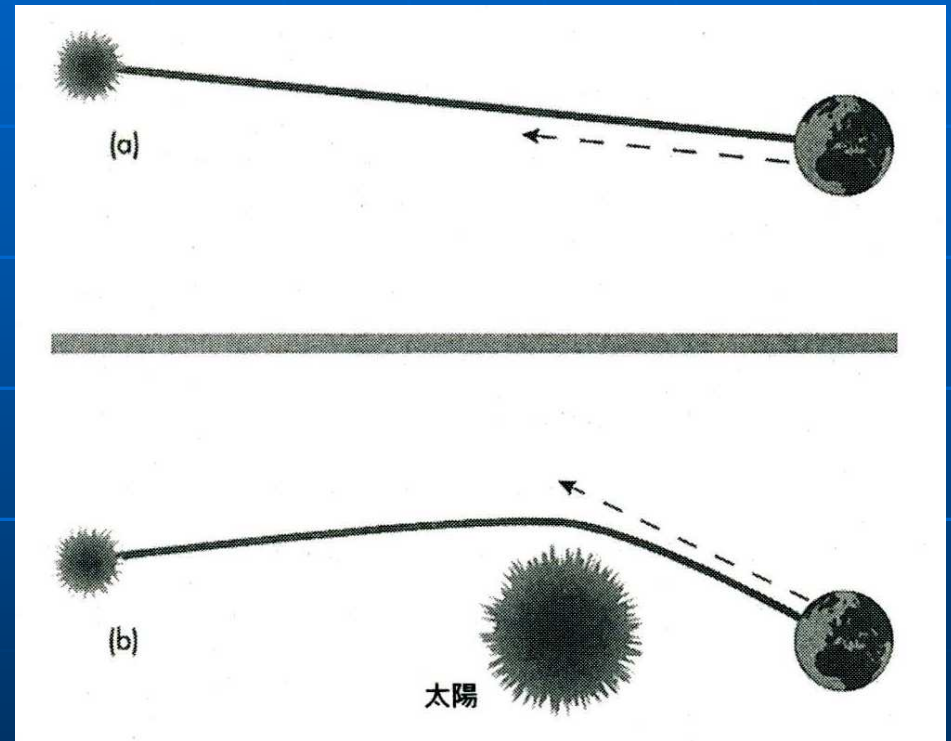
# 重力とは？（アインシュタインの考え）

- 一般相対論(1915-6年)では重力は時間空間のゆがみに。
- 質量やエネルギーがあると、その周りの時間・空間(時空)がゆがむ。
- ゆがんだ時空のなかを物体は“まっすぐ”すすむ。
- 外から見ていると曲がってすすむように見える。



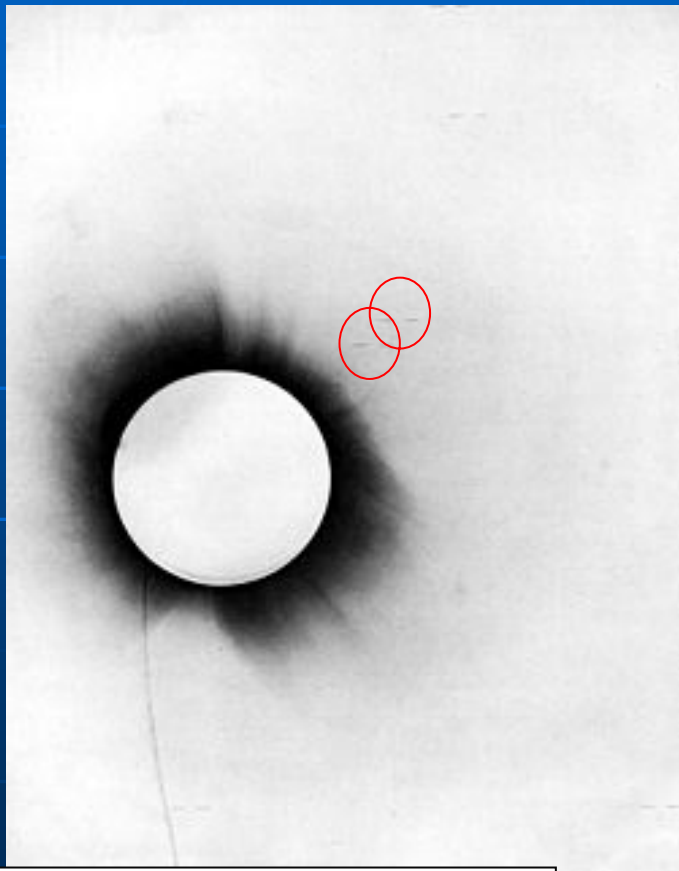
# 光も曲がるんじゃないか？

- 時間、空間がゆがんでいるなら、、物体じゃなくても“曲がる”んじゃないか？
- 光も曲がるんじゃないか？
- 詳しい計算によると太陽のそばを通る光は1.75秒角だけ曲がるはず。(1秒角 =  $1/3600$ 度)
- 太陽のそば = 昼間なので星は見えない、、、どうやって確かめる？





# 日食の時の星の位置のずれ (一般相対論の実験的証明)



1919年の皆既日食の写真



アーサー・エディントン

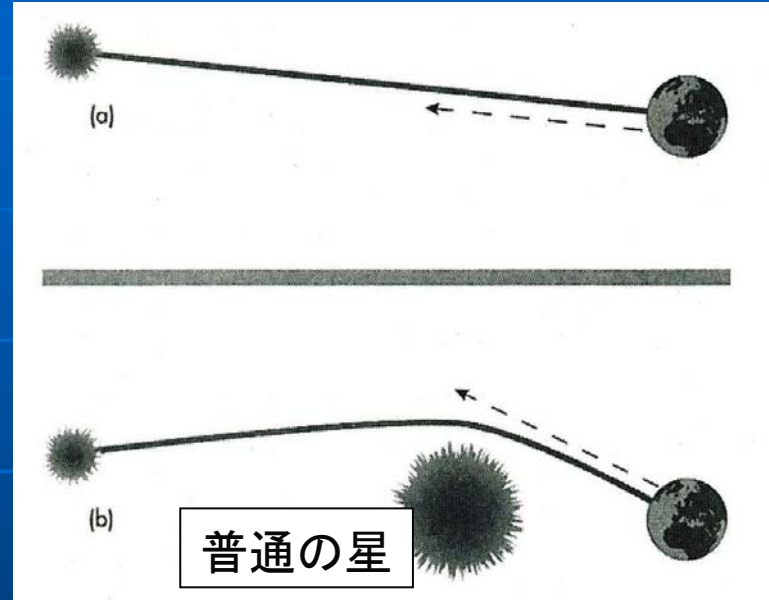
一般相対論による予測 1.75秒角  
観測結果  $1.63 \pm 0.40$  秒角

たしかに光は曲がっていた

一般相対論を  
理解している  
3人目とは  
いったい誰か  
ね？

# 普通の星のそばでも光が 曲がるはずだが、、、

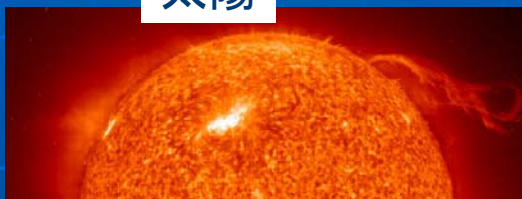
- 太陽じゃなくて普通の星でも曲がるはず、、、
- ざっと計算してみると0.002秒角ぐらい曲がる、、、
- ほとんど観測不可能（すばる望遠鏡の分解能の約1／100）



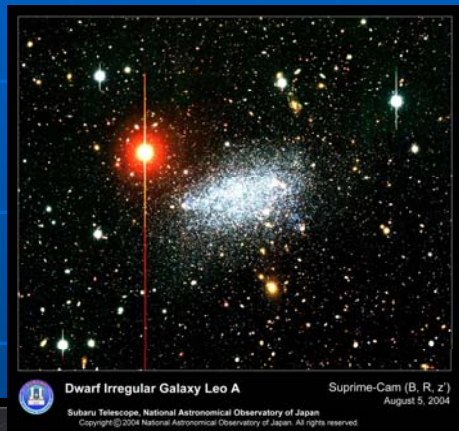
# でも宇宙には星よりももっと大きくて 重いものがあるじゃないか、

## 宇宙の階層構造

太陽



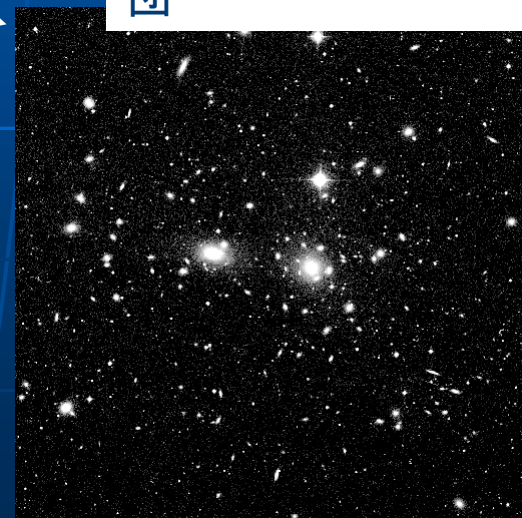
プレアデス星団  
(すばる)



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、銀河団による重力レンズ

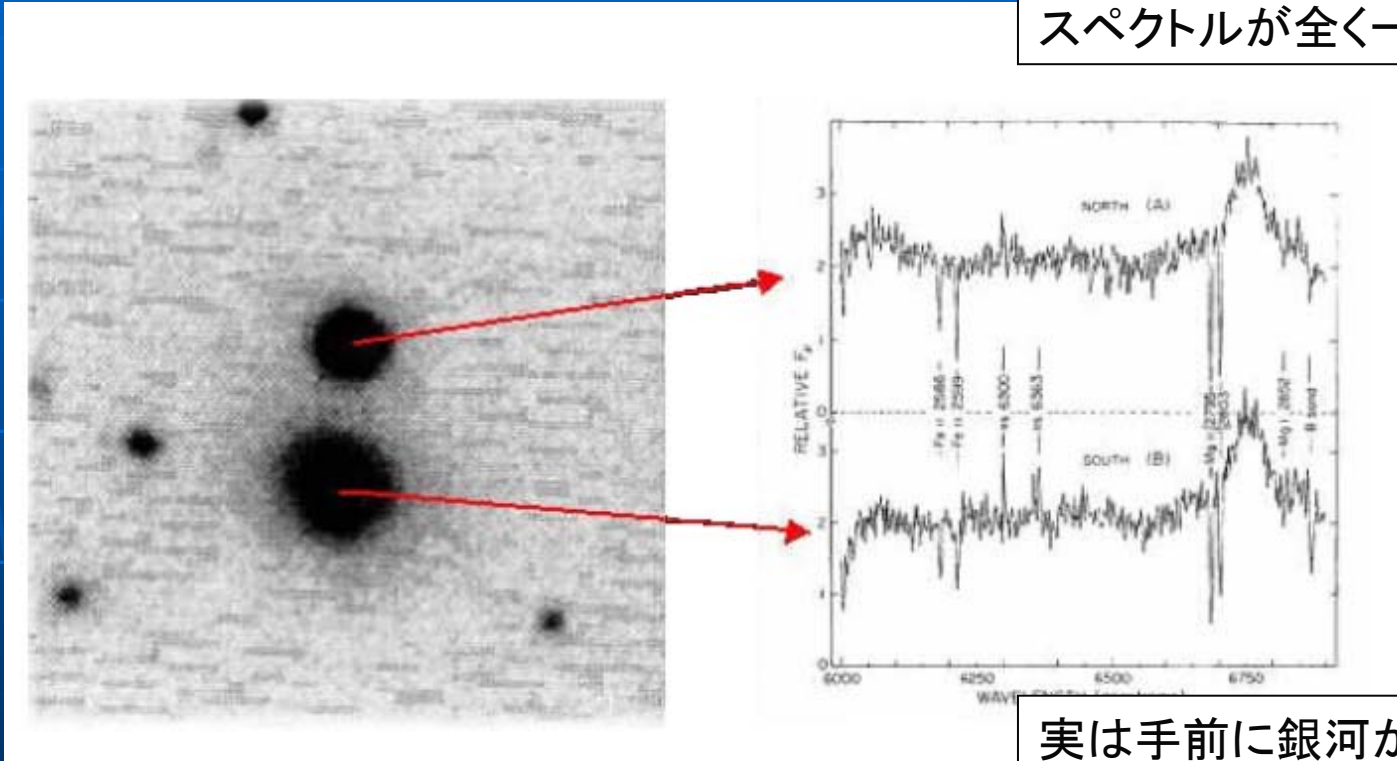


ツビッキー

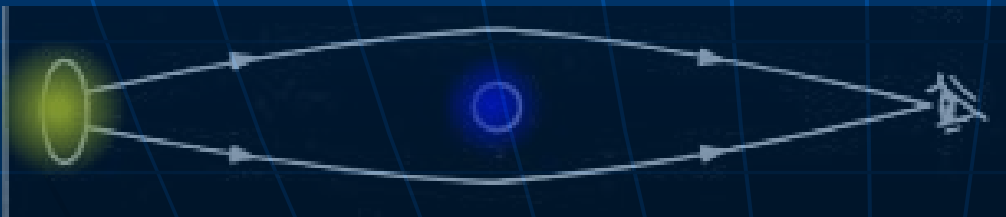
銀河のそばを通る  
光だったら10秒角  
ぐらい曲がるから観  
測可能なんじゃな  
いか(1973年)

# 重力レンズ現象の発見(1979年)

双子のクエーサーQ0957+561A,B  
スペクトルが全く一緒

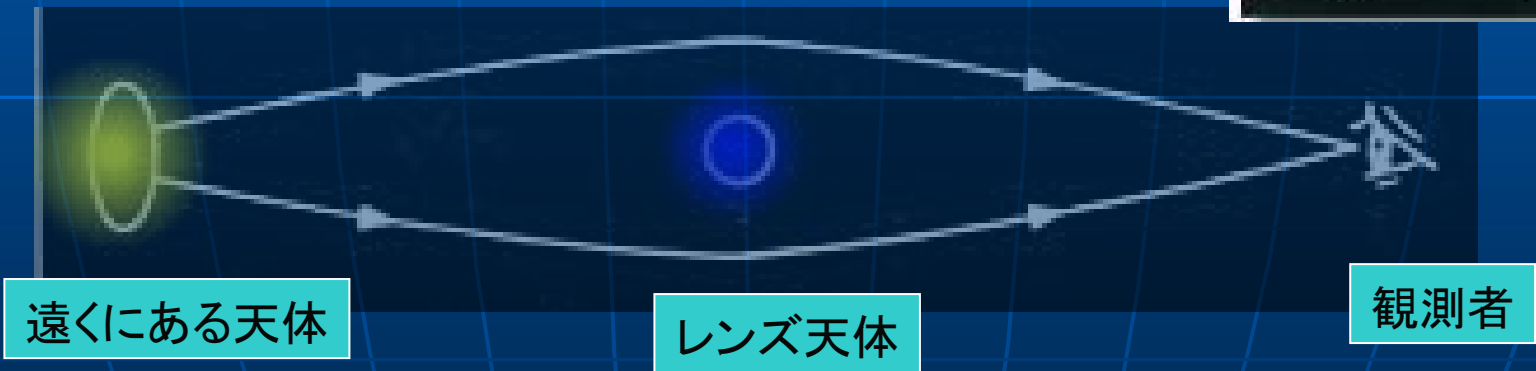
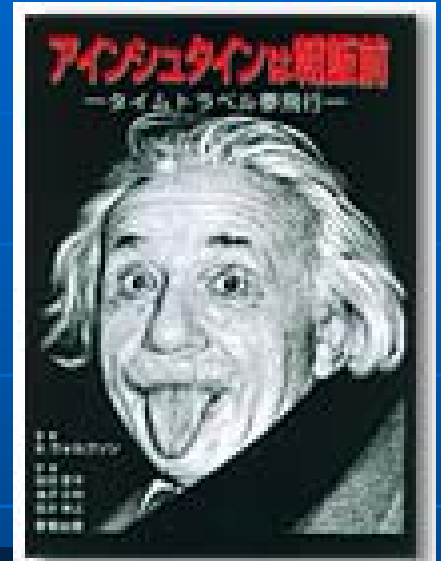


実は手前に銀河があって、1つのクエーサーがレンズされて二つに見える



# 暗黒の世界を見る：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）  
光っているか光っていないかにかかわらず効いてくる  
----> "暗黒の世界" も見えるかも





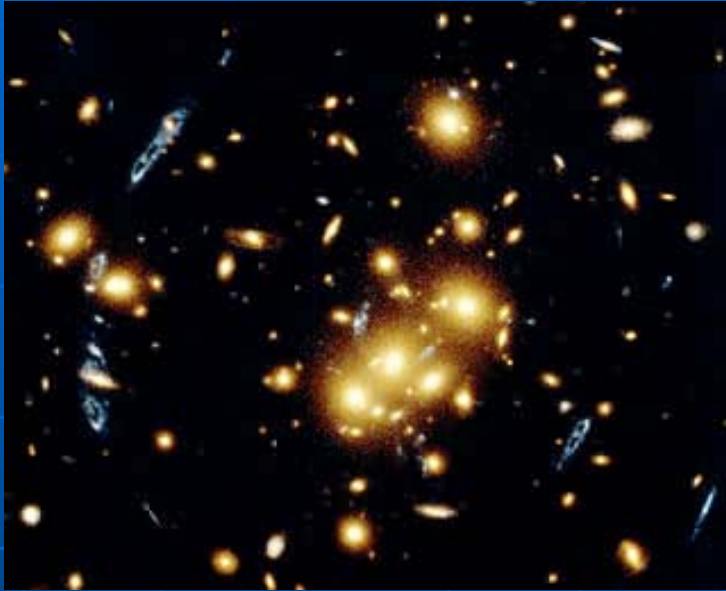
**Galaxy Cluster Abell 2218**

**HST • WFPC2**

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, STECF) • STScI-PRC00-08

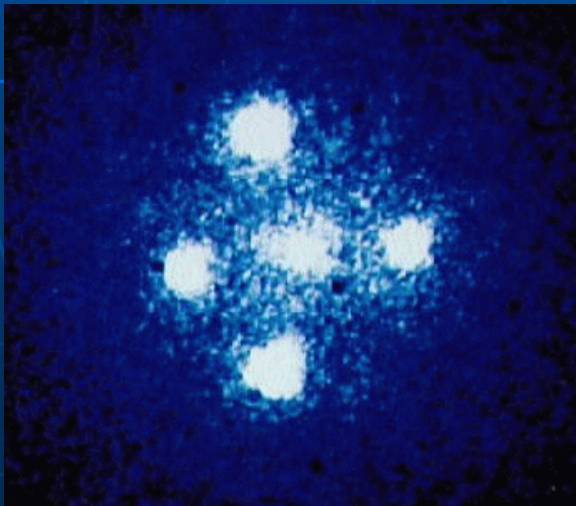
円弧状に見えているのは遠くにある銀河が重力レンズ効果を受けてゆがんで見えているもの

# 重力レンズと暗黒物質



背景にある天体からの光が重力によって曲げられる。曲げられ方は手前にあるレンズ天体の質量で決まる。

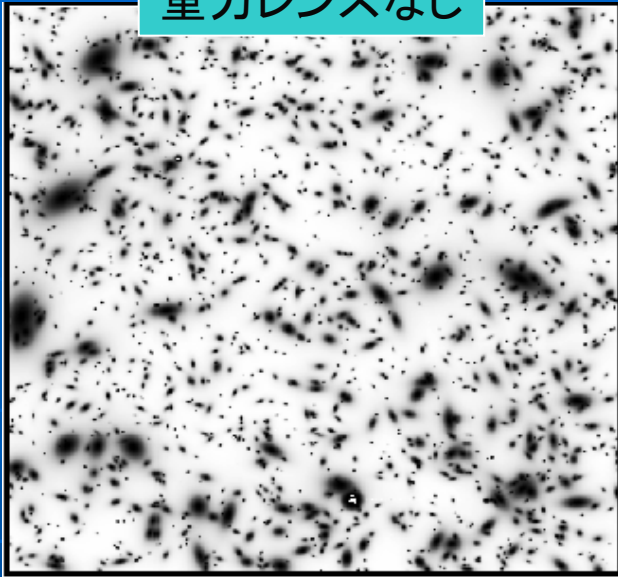
詳しく調べることで光っていない物質（暗黒物質）まで含めた物質の量や分布がわかる



光っている物質の10倍程度の暗黒物質が必要



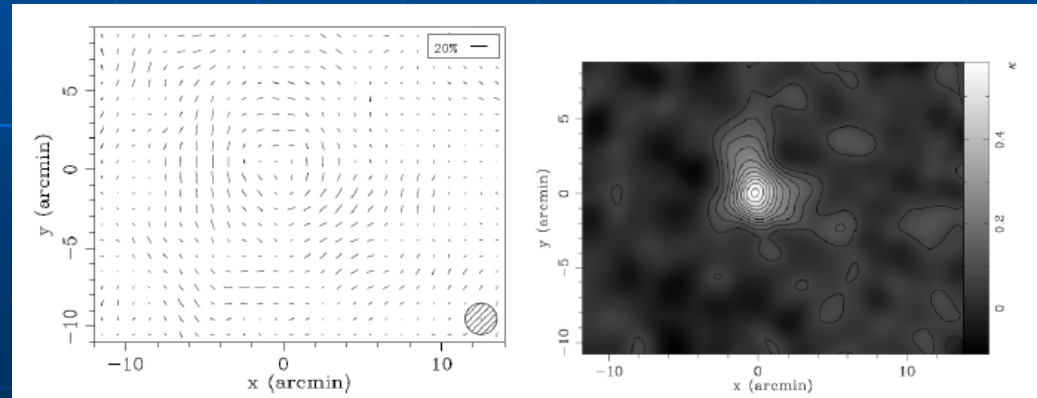
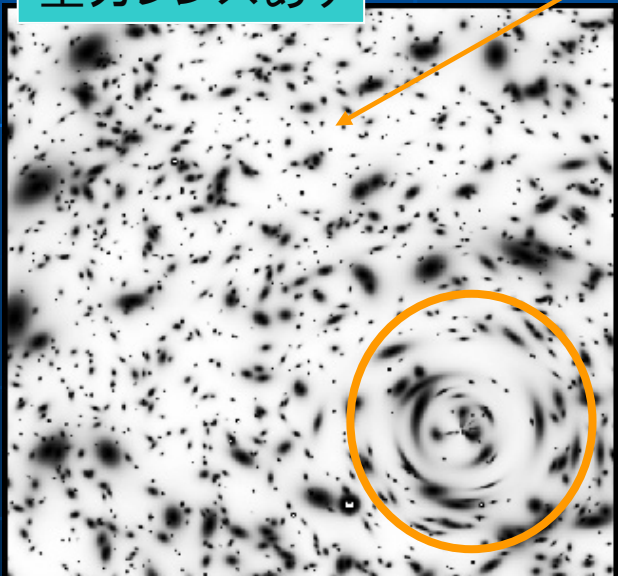
重レンズなし



# 弱い重力レンズ効果

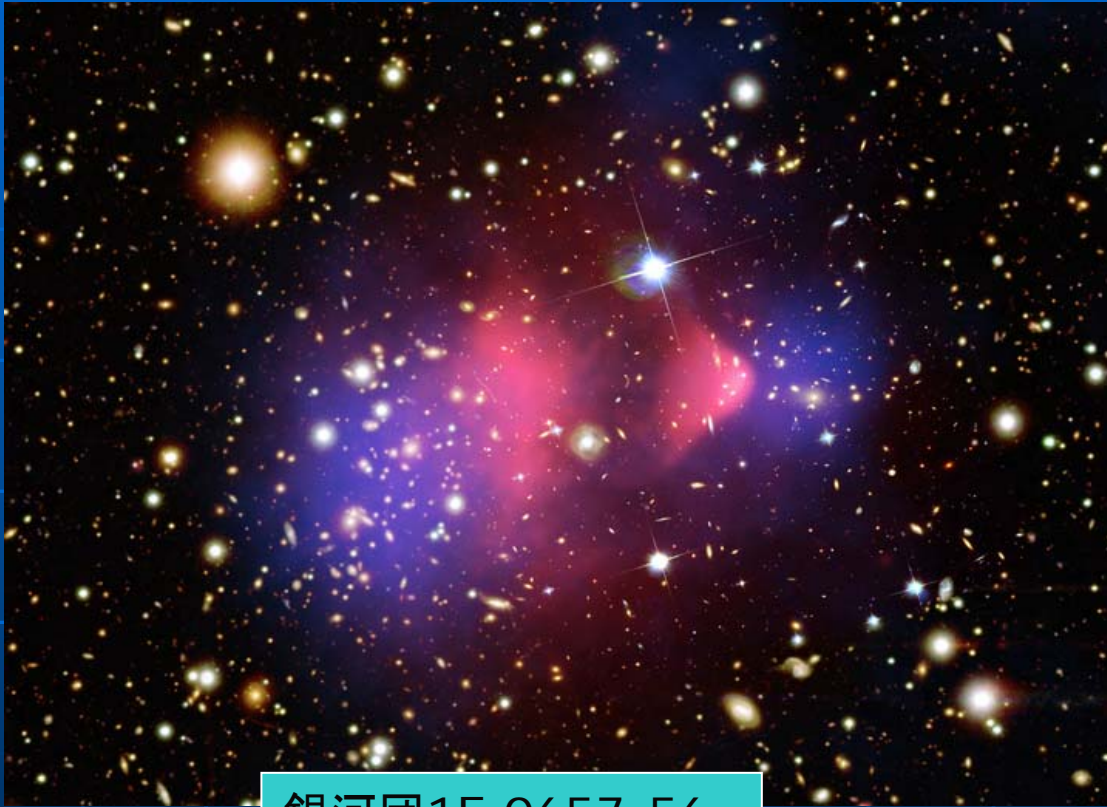
実はこのあたりにある銀河も重力レンズ効果を受けて少しづつゆがんでいる。  
多数の銀河のゆがみ具合の平均をとることで、重力レンズ効果を検出できる

重レンズあり



左： 銀河の平均的なゆがみ具合  
右： それから再現した質量分布

# 重力レンズで暗黒物質を見ると



銀河団1E 0657-56。  
高温ガス(ピンク)と  
暗黒物質の分布(青)

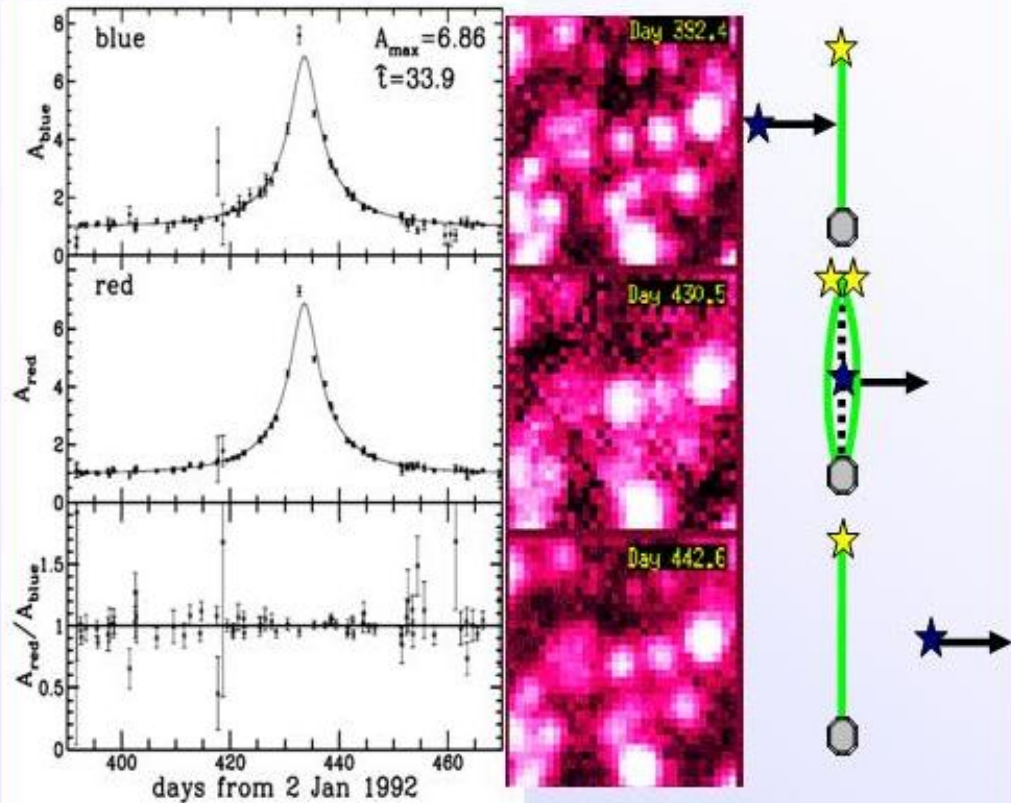
高温ガス(X線で光っている物質)  
と暗黒物質で分布の様子が違う

実は光っていない場所にたくさん  
物がある。

# マイクロレンズズ

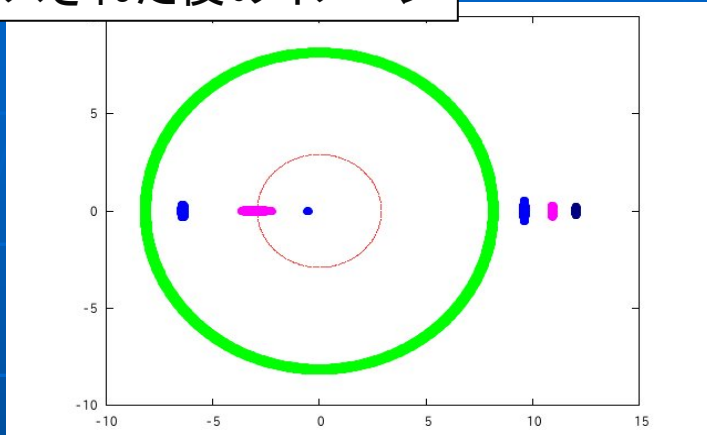
- 多重像が空間的に分離できないと、見かけ上明るくなったように見える。
- 銀河系内の暗い星の探査
- 太陽系以外の惑星の探査にも

- Microlensing
- 見かけの明るさを大きくする

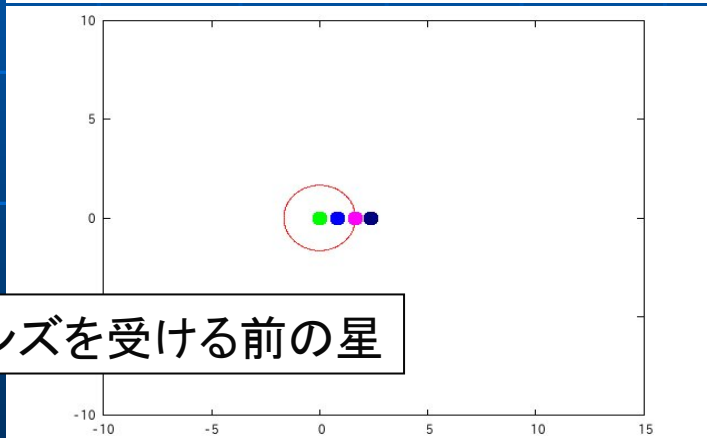


# 山形大学での研究の紹介

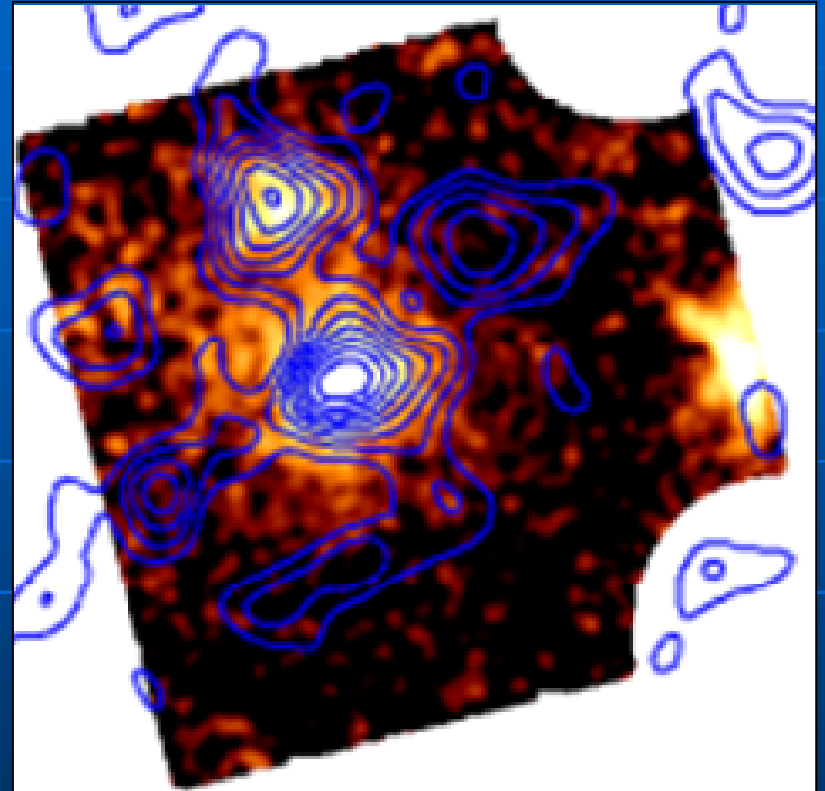
レンズされた後のイメージ



レンズを受ける前の星



光内君(2008年度修了)  
の修士論文より  
重力レンズの理論計算

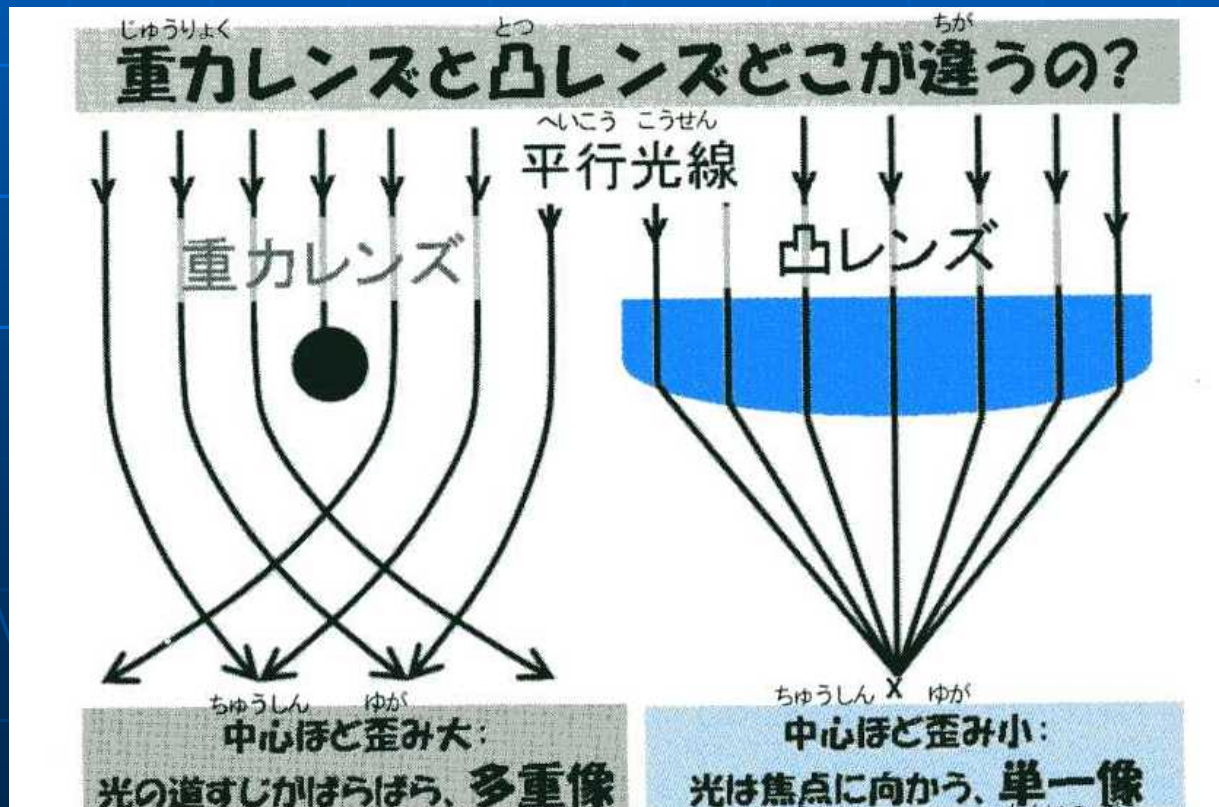


修士2年渡邊さんが解析している  
観測データ  
等高線: 暗黒物質の分布  
カラー: X線で光っている物質の分布



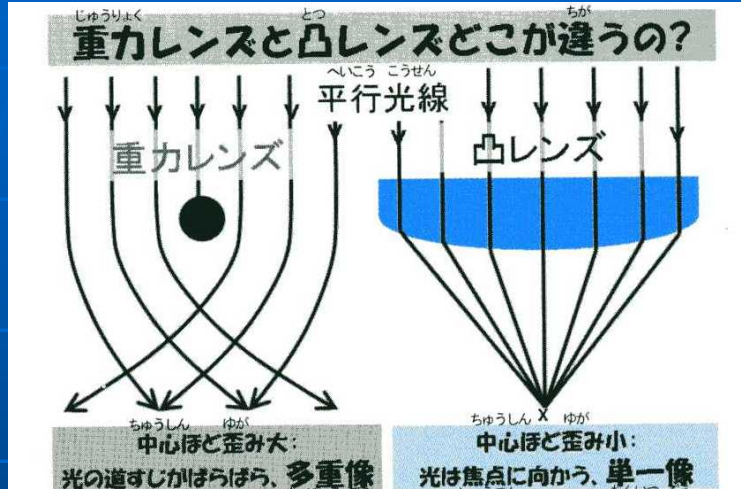
# 「重力レンズ」レンズ？

- 普通のレンズを使って重力レンズ現象を再現できないか？
- そういうレンズを作っちゃえ！！！！





# 「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

# 第一部のまとめ

- 質量をもった物体のまわりでは時空がゆがむ。
- ゆがんだ時空の中を光は“まっすぐに”すすみ、結果として曲がる(重力レンズ)。
- 重力レンズ現象を調べることで、宇宙での暗黒物質までふくめた物質の分布がわかる。
- 暗黒物質は光っている物質の10倍くらいあるらしい。
- 暗黒物質と光っている物質の分布はいつも同じというわけではない。

# 第二部：宇宙を支配する暗黒物質 & 暗黒エネルギー

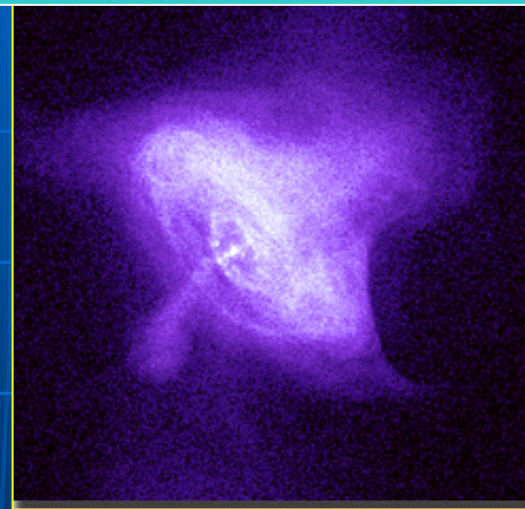
- 宇宙の階層構造
- 暗黒物質とは？
- どれくらい暗黒物質があるのか？
  - 銀河の場合
  - 銀河団の場合
- 暗黒物質の正体は？
- 宇宙膨張
- 暗黒物質 & 暗黒エネルギー

# 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)

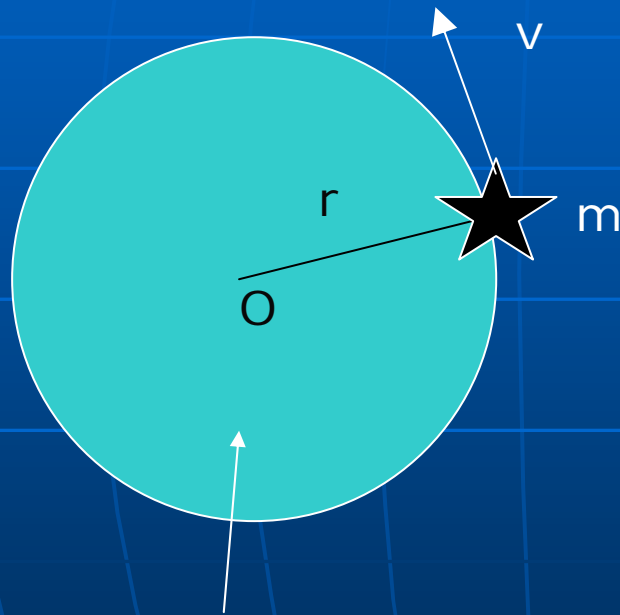
Suprime-Cam (B, V, H $\alpha$ )

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  
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



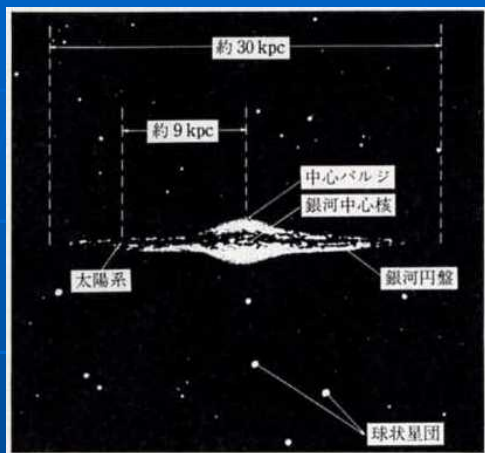
近づくときは  
サイレンの音は高くなる

遠ざかるときは  
光は赤くなる

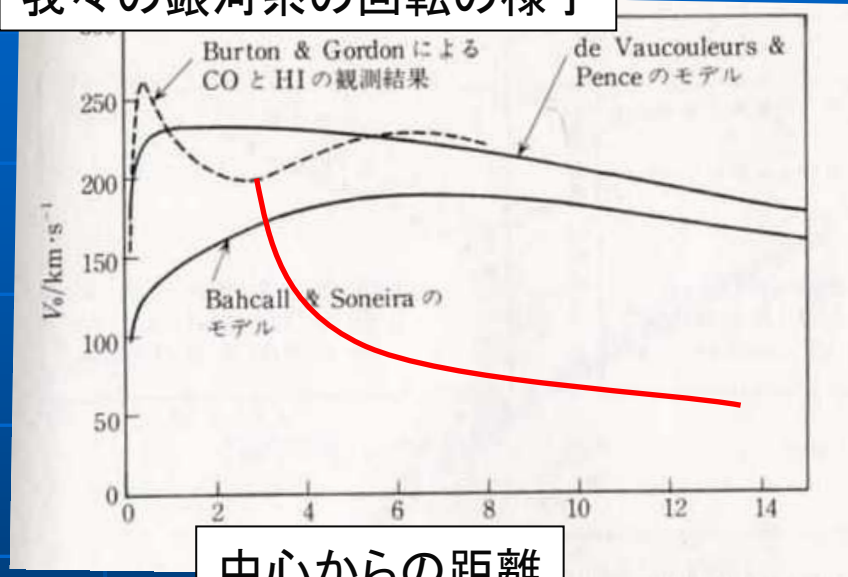


近づくときは  
光は青くなる

# 渦巻き銀河の暗黒物質

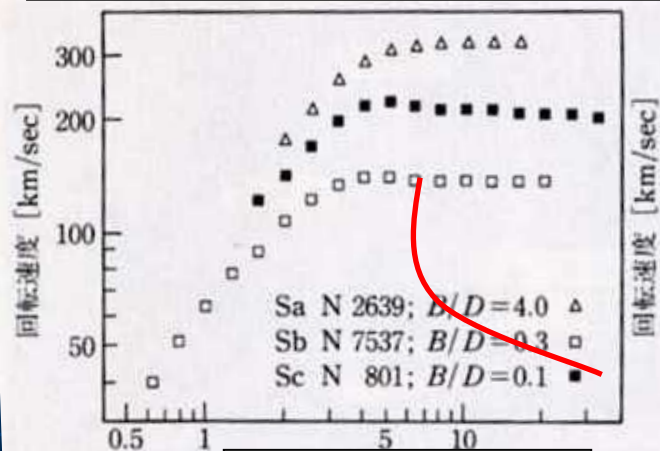


我々の銀河系の回転の様子



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

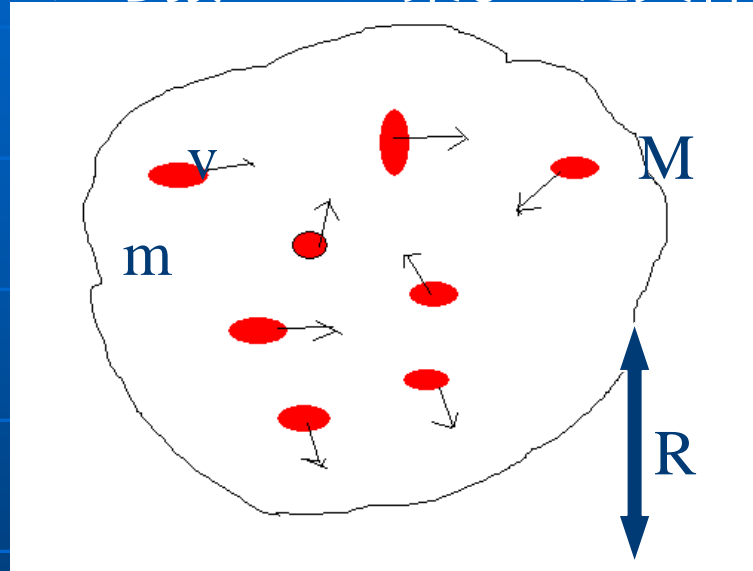
光っている物質だけを考えると外側では赤線のように回転速度は落ちるはず、、、

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)

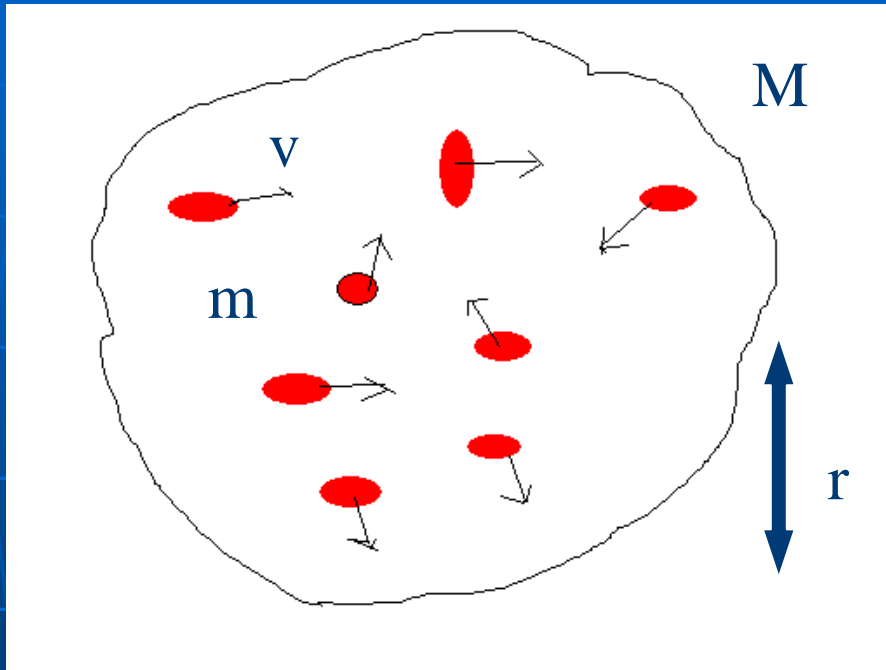
銀河団：銀河が数100から数1000集まった天体



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)

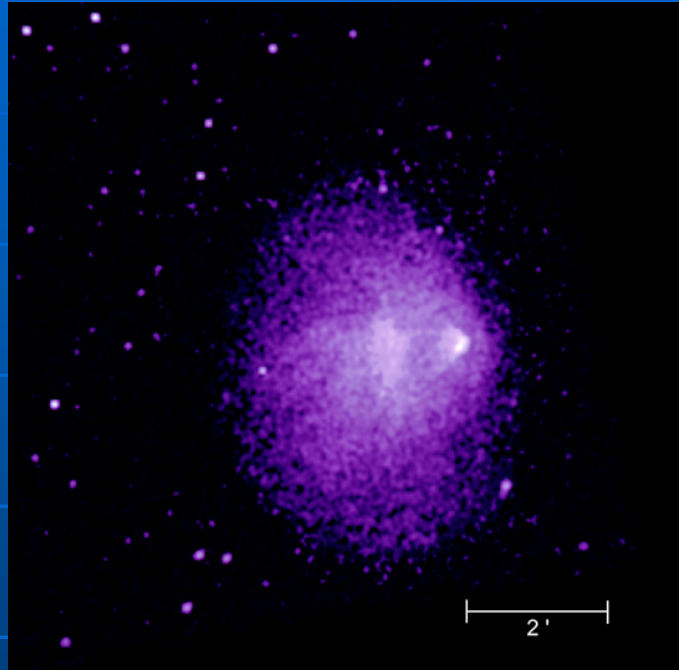
cf. ケプラーの法則を使った場合  
 $M(r) = rv^2 / G$

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



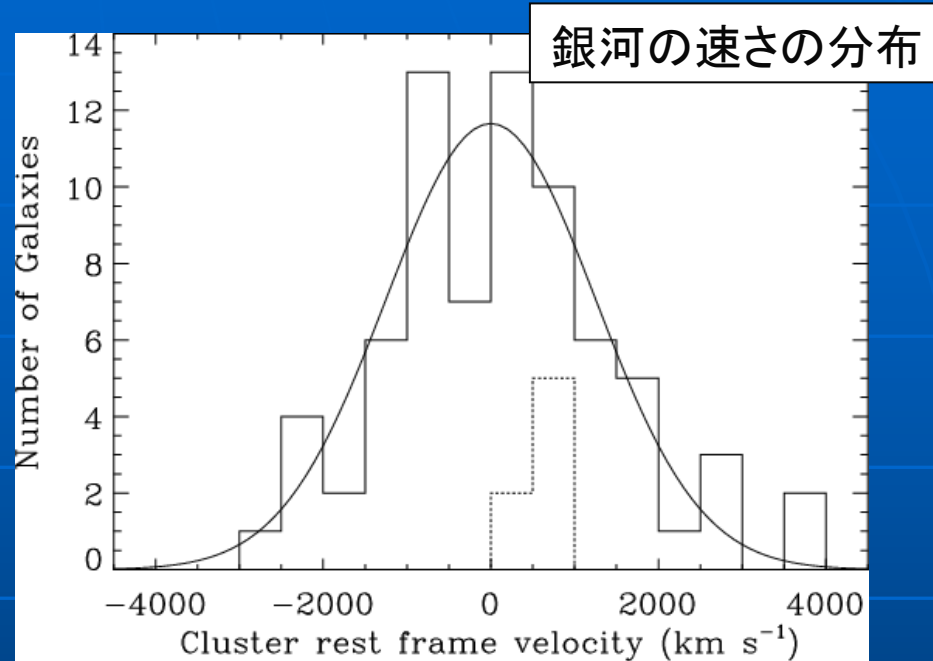
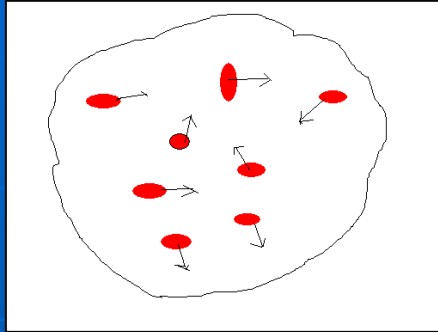
X線イメージ：  
銀河団全体を覆う高温ガス

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)

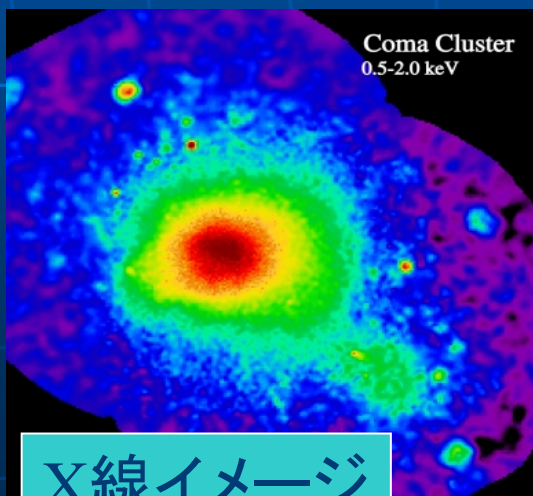
# 質量をはかる別のやり方： 高温ガスを使う



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。



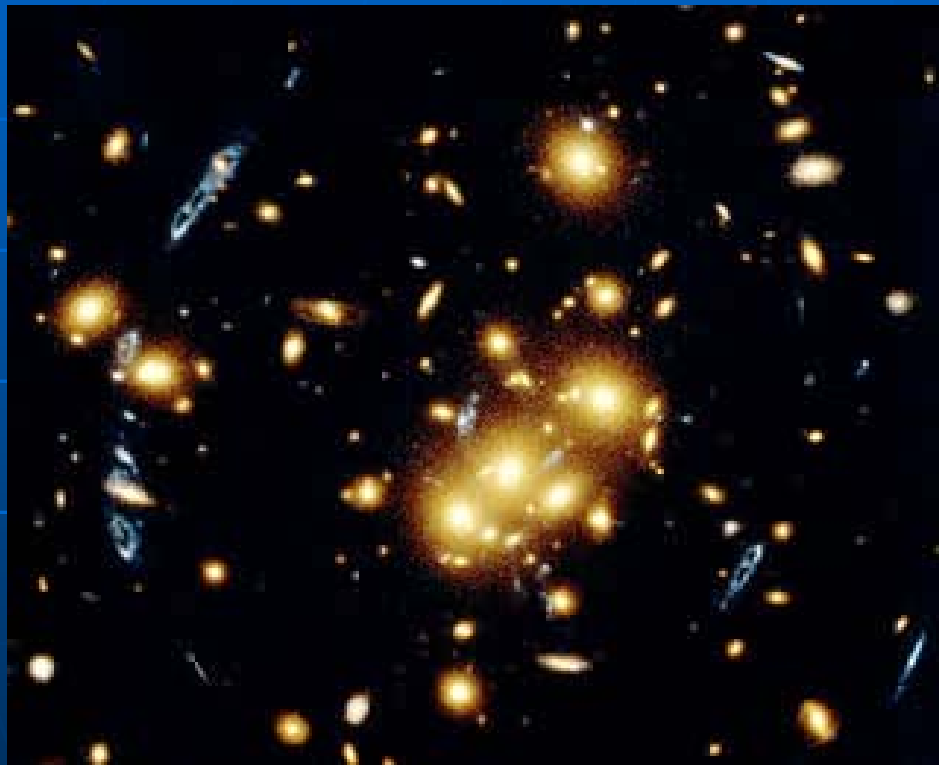
X線イメージ

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



# 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

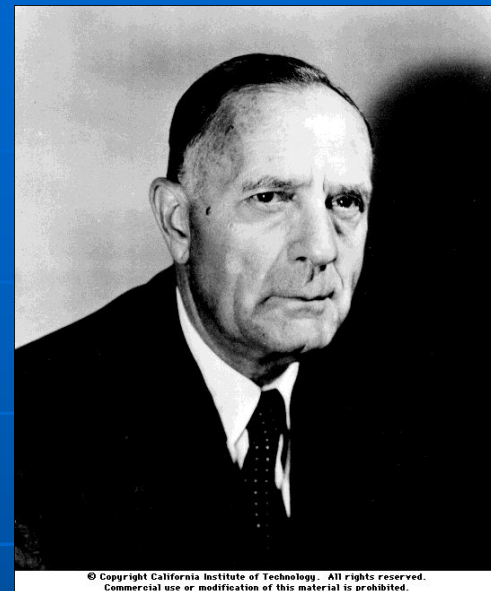
やっぱり光っている物質の10倍程度の質量が必要

# 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。



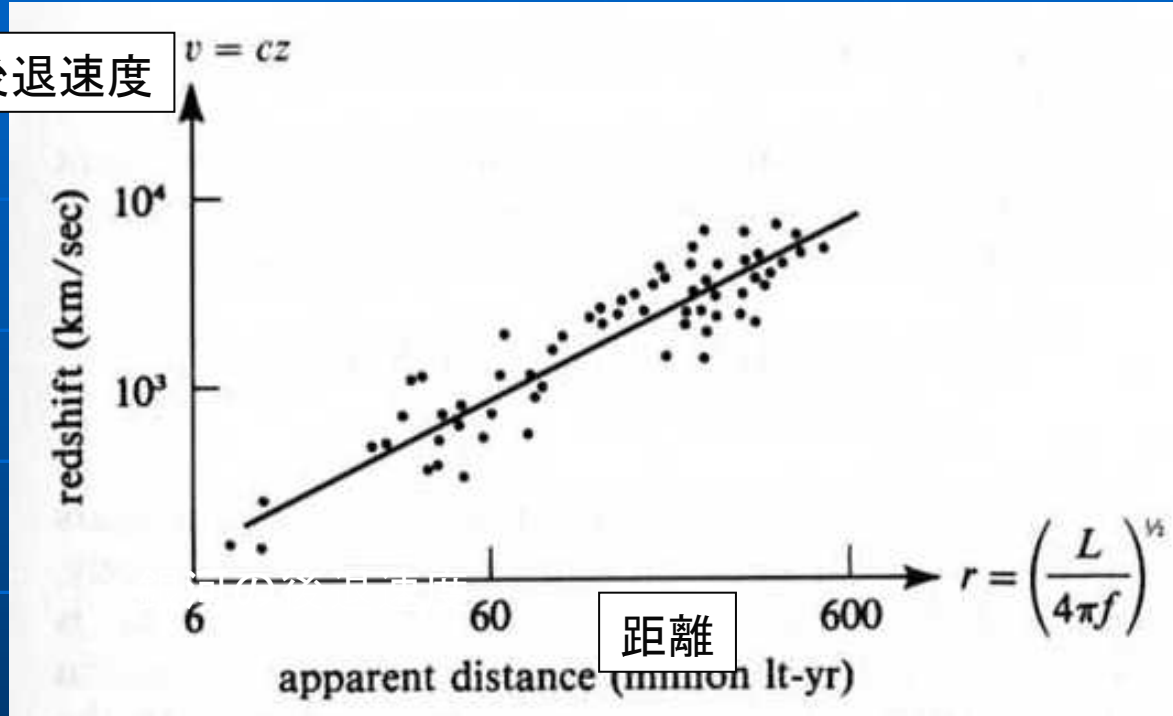
© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.  
Commercial use or modification of this material is prohibited.

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

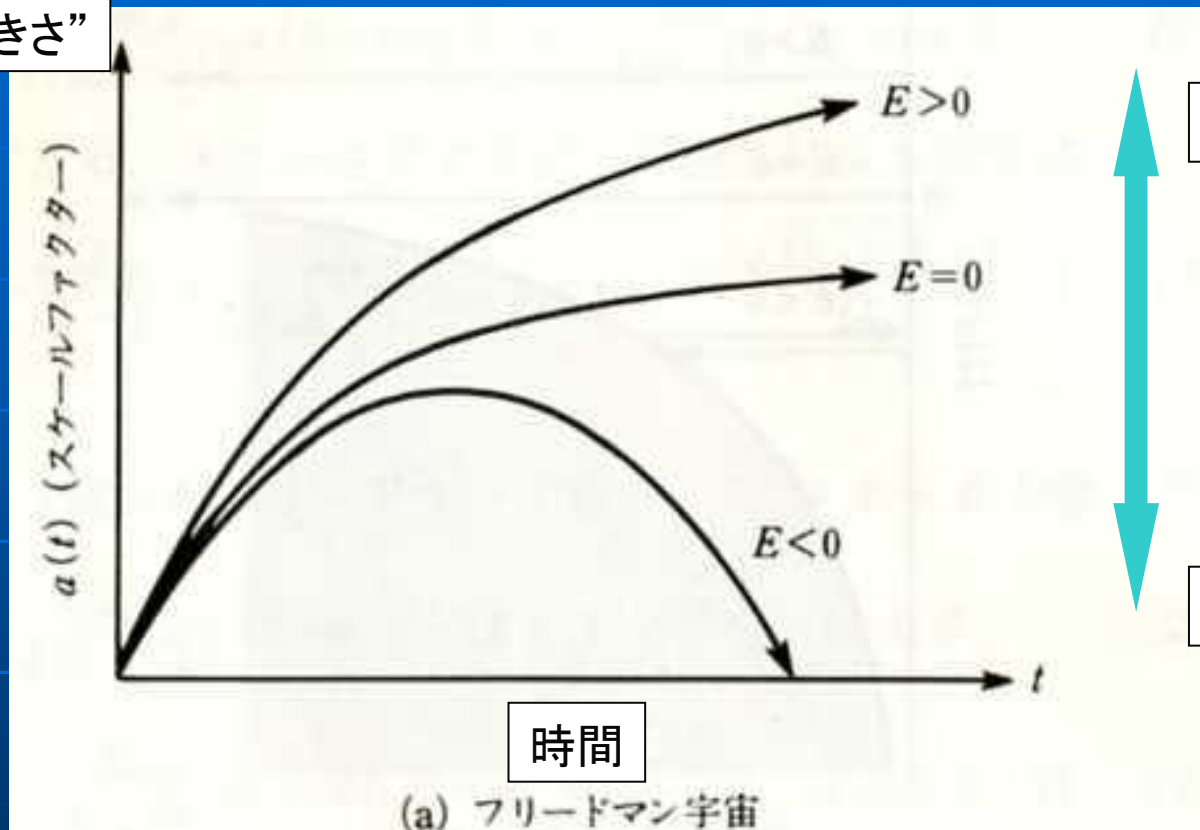
- 宇宙は大爆発(ビッグバン)からはじまった。
- 最初の爆発の勢いvs重力
  - 最初の爆発は膨張させる方に
  - 重力は膨張を止める方にはたらく
- 最終的にどちらが勝つのか？
- 重力の強さ(物の量)が大事
  - 月でボールを投げたら遠くまで投げやすい





# 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

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。

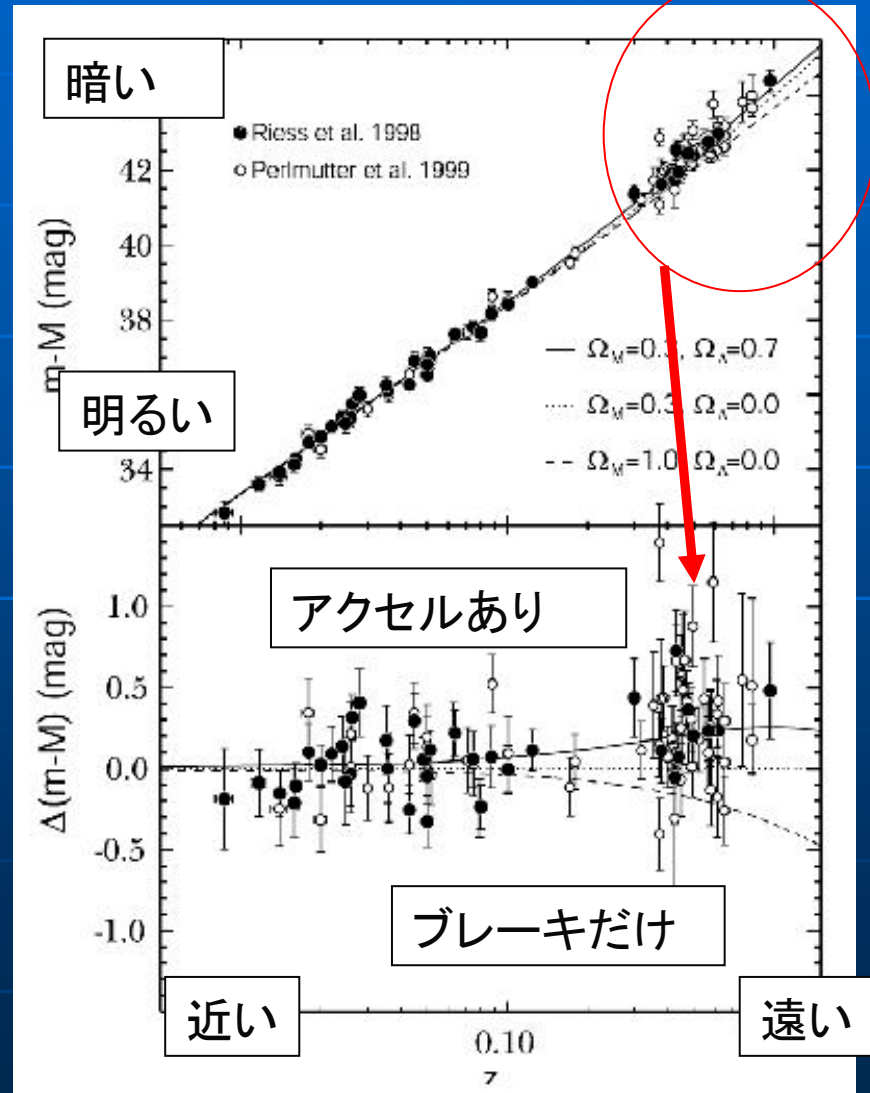
# 宇宙膨張とロケット

- 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”



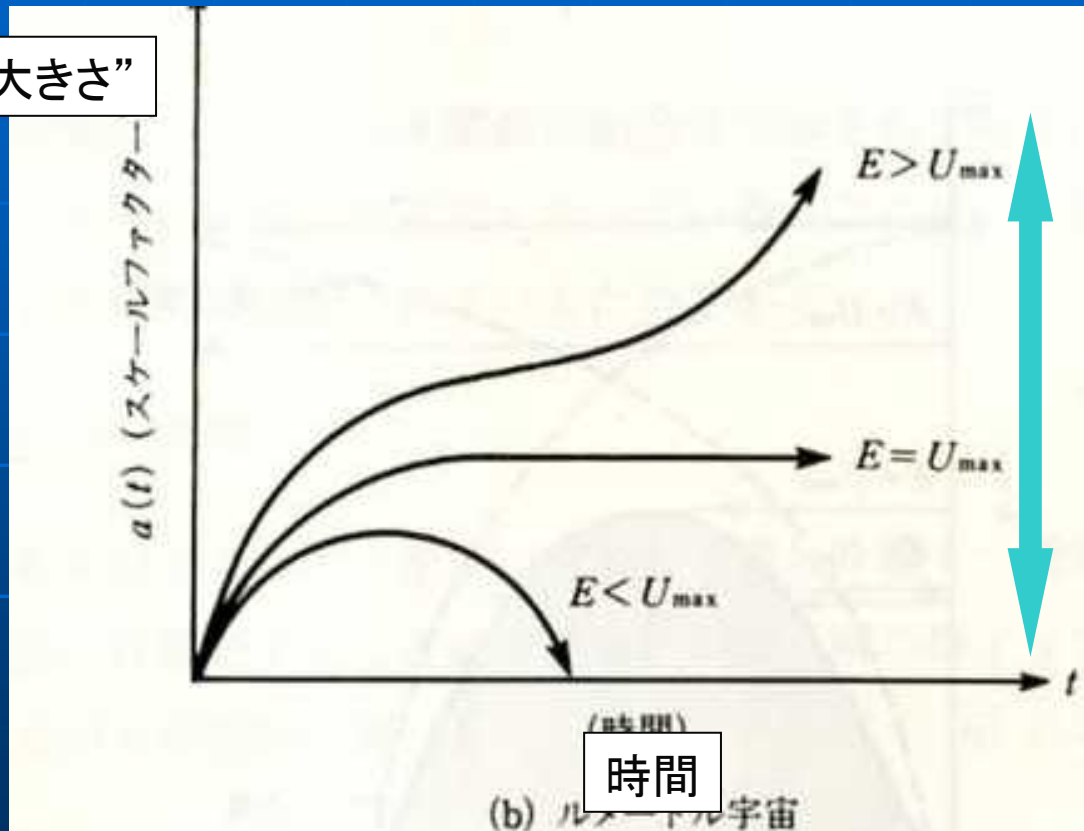
# アクセルもあるらしい (暗黒エネルギー)

- 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

(b) ルマーデル宇宙

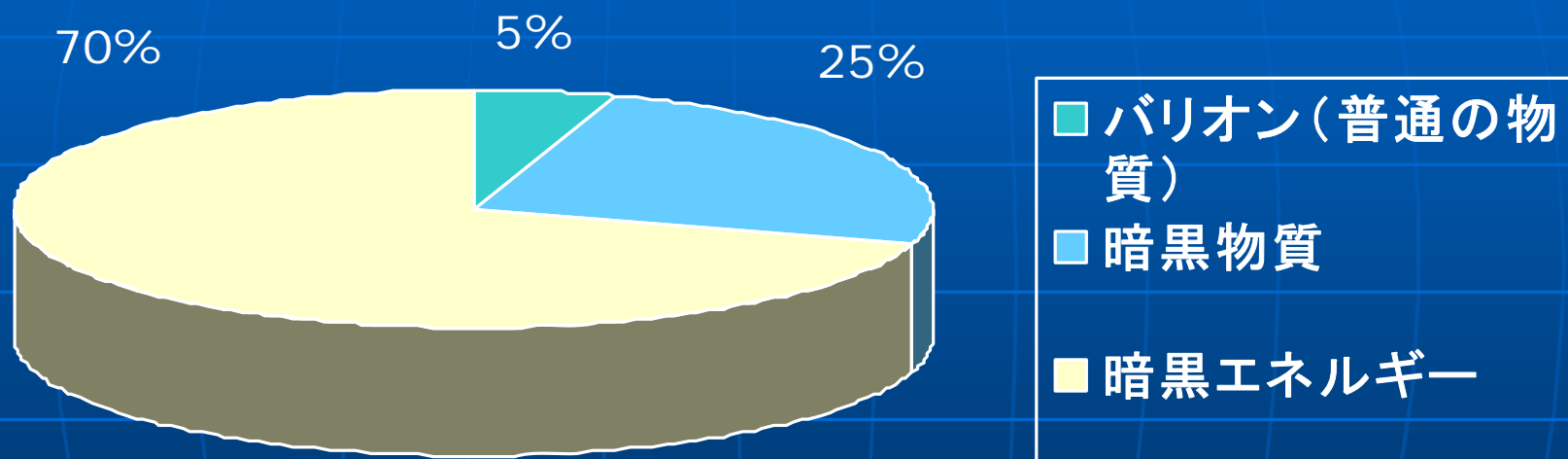
“暗黒エネルギー”による“反発力”があると、  
宇宙膨張はどんどん速くなっていく。  
(どうも我々の宇宙はそうなっているらしい)

# 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！！！！

# 第二部のまとめ

- 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。