

# 宇宙の蜃気楼：重力レンズ

第一部：宇宙の階層構造  
第二部：重力レンズ

滝沢元和(山形大学理学部)

相馬高校出張講義

2023.1.24

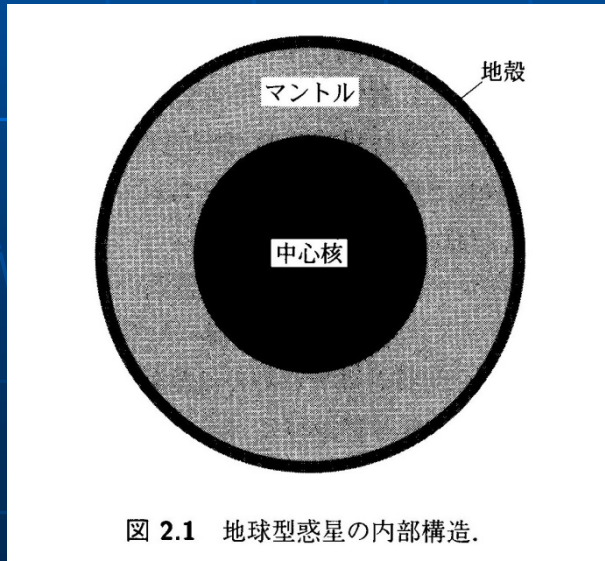
# 第一部：宇宙の階層構造

# 宇宙の階層構造

- 宇宙では物は必ずしも一様には分布していない。
- スケール毎に特徴的な構造が見られる。  
——>宇宙の階層構造
- 小さい——>大きい  $\equiv$  近い——>遠い
- 地球からスタートしてより大きな(遠くの)構造を俯瞰してみる。

# 地球

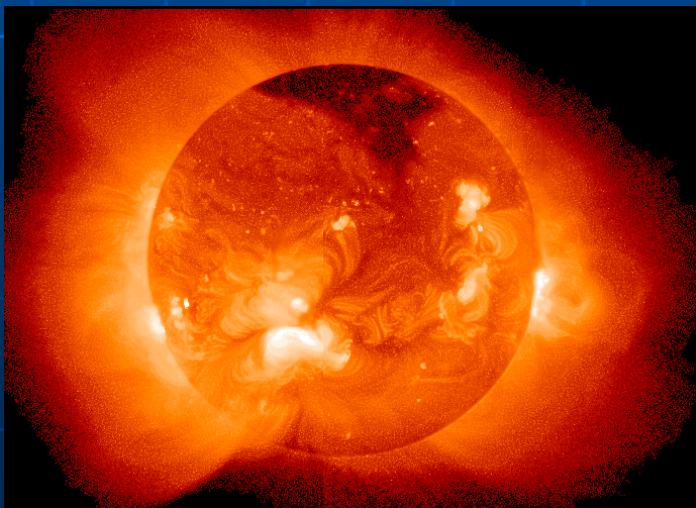
- 質量  $5.97 \times 10^{24} \text{kg}$
- 半径 6375 km
- 中心に金属核(主に鉄とニッケル)
- そのまわりを岩石
- 表面に薄い大気(酸素、窒素、)



# 太陽



- 質量  $1.99 \times 10^{30} \text{kg}$   
(地球の33万倍)
- 半径  $6.96 \times 10^8 \text{m}$   
(地球の110倍)
- 地球から一番近い恒星  
(普通の星)
- 水素からヘリウムへの核融合をエネルギー源にして自ら光り輝く。

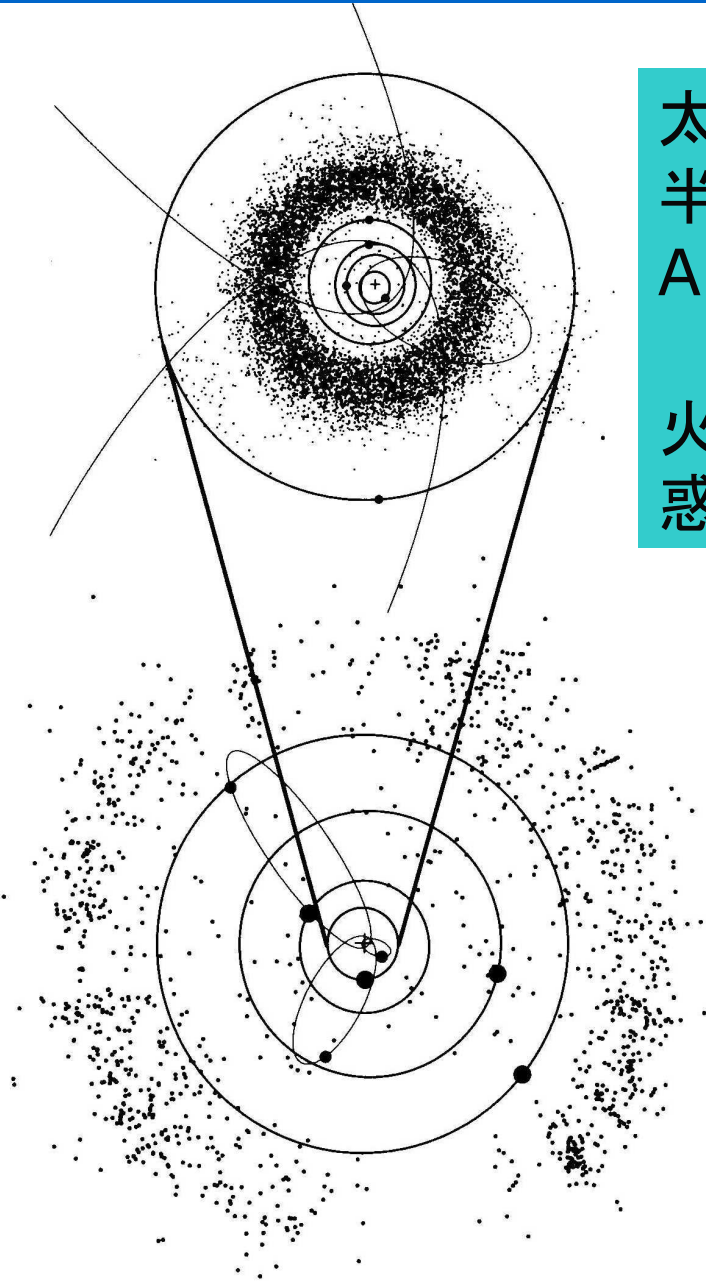


# 太陽系(1)



- 太陽を中心にして、その周囲を様々な小天体が運動
- 惑星(水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星)とそれらの衛星(月など)
- 小惑星
- 彗星
- 太陽系外縁天体(冥王星など)

# 太陽系(2)



太陽系の概観:木星より内側  
半径 5.2AU

AU:地球と太陽の距離

火星と木星の間には無数の小惑星が分布している

太陽系の概観:木星より外側  
海王星軌道で半径 30.1AU

AU:地球と太陽の距離

海王星の外側に太陽系外縁天体が多数存在。冥王星はこの種の物のなかで大きめの物

# 銀河系

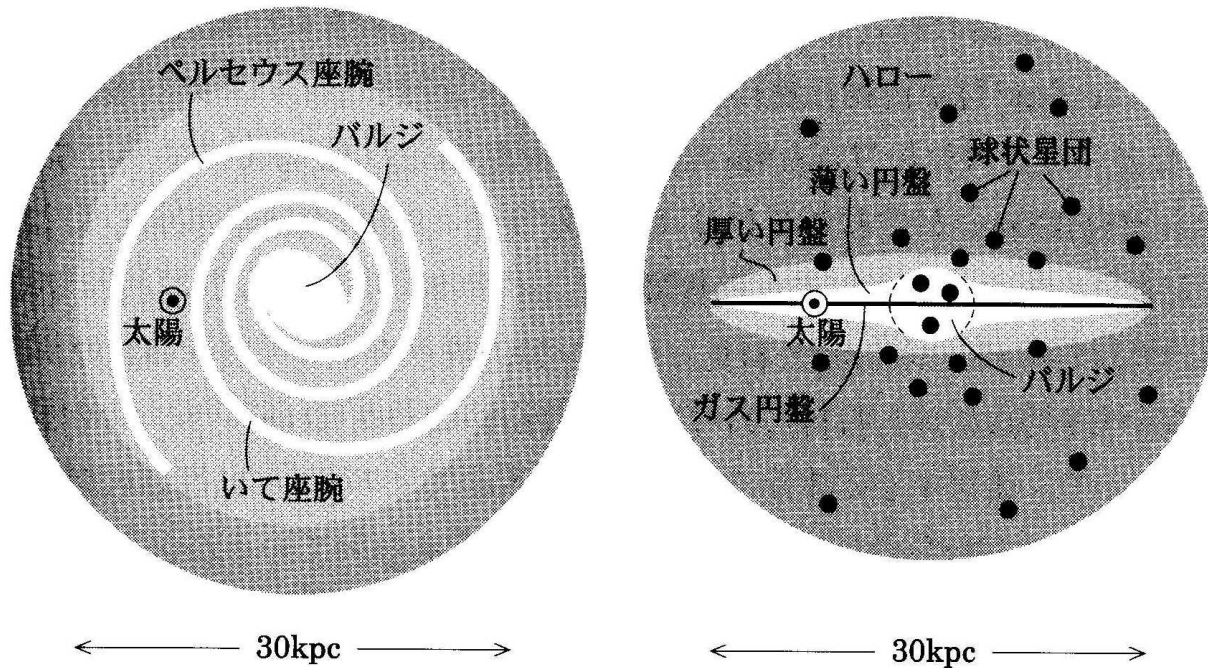


図 1.24 現代の銀河系像の概略。(左) 円盤正面から見た構造、(右) 円盤側面から見た構造。



銀河系を外から見たら  
たぶんこう見える

- 太陽系は「銀河系」という星の集団の一員。
- 銀河系は円盤状で直径おおよそ98000光年
- 太陽系は中心から26000光年離れた“田舎”にある。
- 1光年= $9.4 \times 10^{12}$ km (光が1年間にすすむ距離)





楕円銀河

渦巻き銀河



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

口径50cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12→F7.31, レデューサ使用)  
冷却CCDカメラ (MOTCON CF-16)  
露出時間: 10分×5, フィルタ: R-60, 疑似カラー処理, 画像範囲: 12.63×8.51'  
観測場所: 国立天文台 (三鷹)

H. Fukushima and Y. Ishibashi 国立天文台 広報普及室

NGC4548 [M91?] (かみのけ座にある棒渦巻き銀河)



棒渦巻き銀河

M91は、メシエのカタログの位置には存在が確認されていない。いくつかの候補、説があるが、NGC4548はそのうちのひとつである。

口径50cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12), 液体窒素式冷却CCDカメラ (Astroned 32000ウズ)  
露出時間: 6分×6, フィルタ: 1バンド, 疑似カラー処理, 画像範囲: 12.80×8.71'

H. Fukushima and T. Sekiguchi 国立天文台 広報普及室



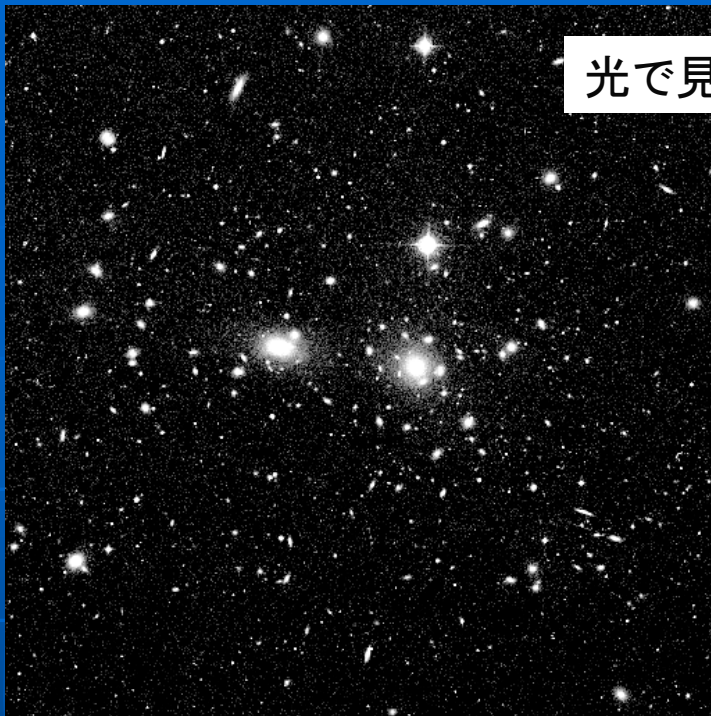
Dwarf Irregular Galaxy Leo A Suprime-Cam (B, R, I)  
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan  
Copyright © 2004 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved

不規則銀河

# 銀河

- 銀河系のようなものは宇宙に無数にある(銀河)
- 太陽のような星が数千億個ぐらい集まった天体。
- 何種類かの特徴的な形態を持つ
  - 楕円銀河
  - 渦巻き銀河
  - 棒渦巻き銀河
  - 不規則銀河
- 恒星、ガス雲、正体不明の暗黒物質etc

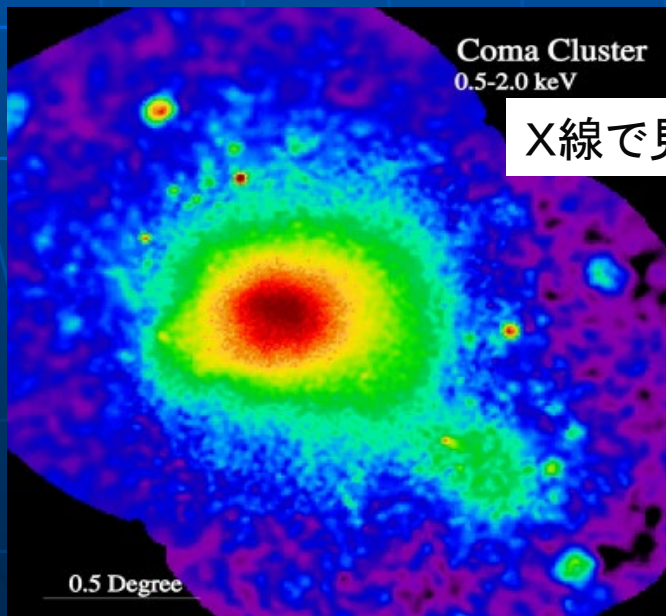
光で見た銀河団



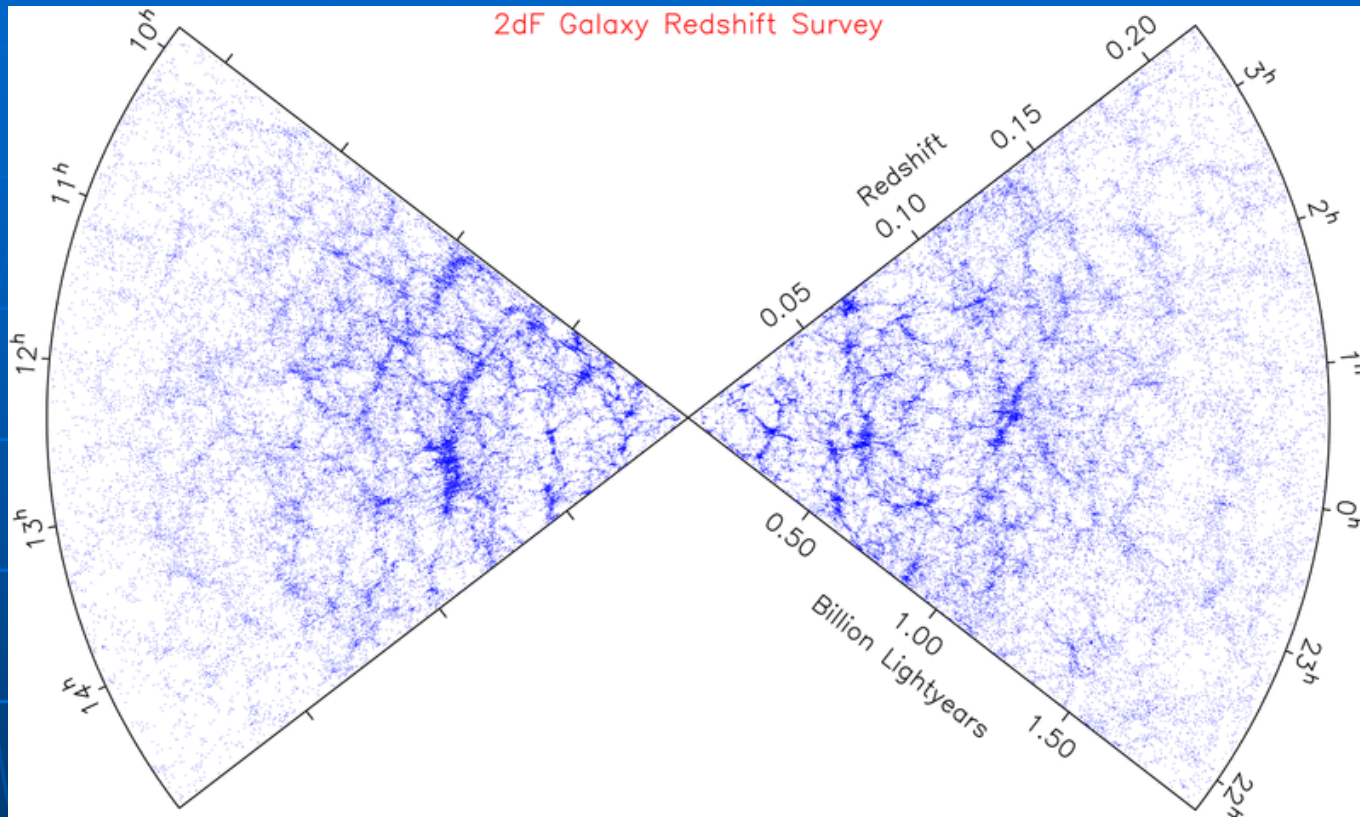
# 銀河団

- 銀河も集団をつくっている。
- 数10—1000個程度の銀河
- 高温ガス
- 正体不明の暗黒物質

X線で見た銀河団

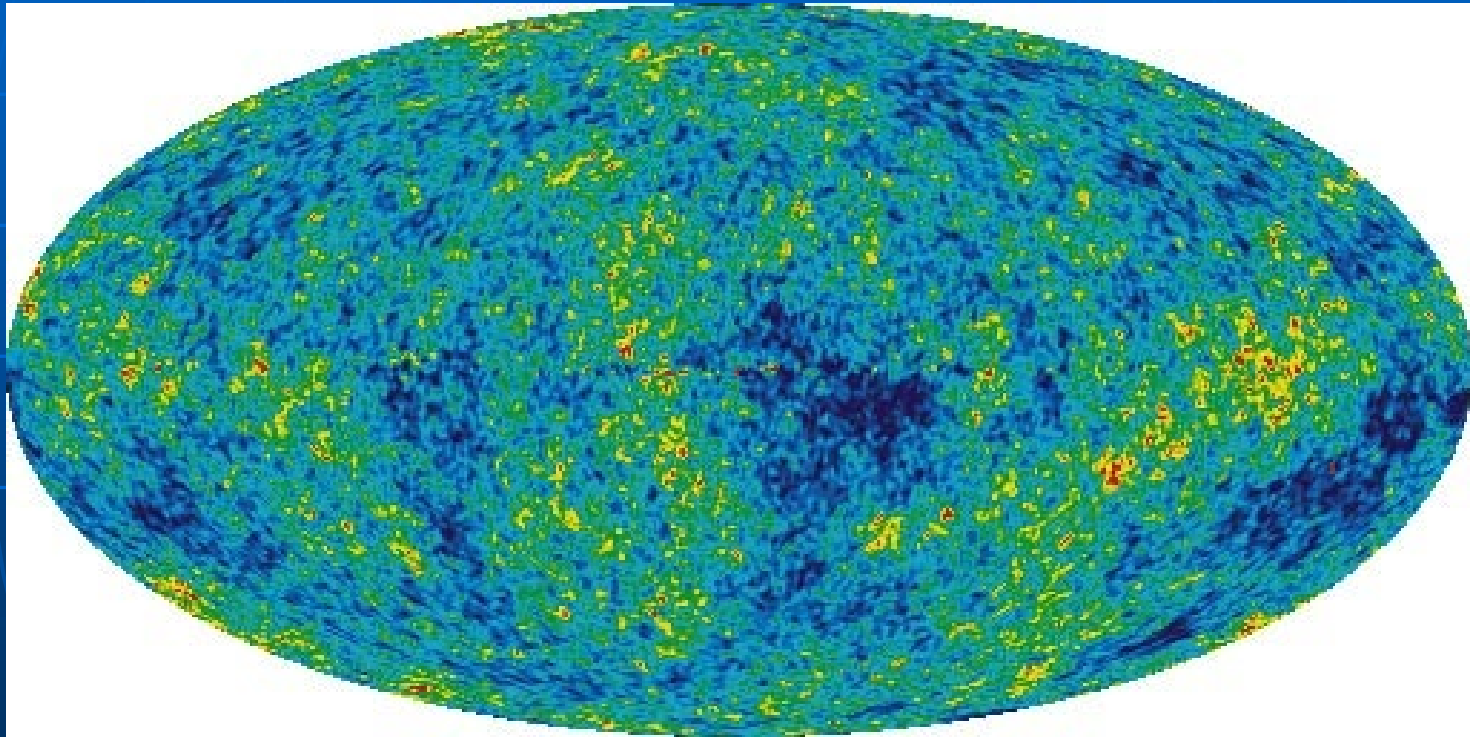


# 宇宙の大規模構造



- 銀河の空間分布を調べてみた。
- 宇宙の中で銀河は一様に分布しているわけではない。
- 網目状の構造

# マイクロ波背景放射： 宇宙がかつて熱かったときの名残



# 宇宙の階層構造：おさらい

地球



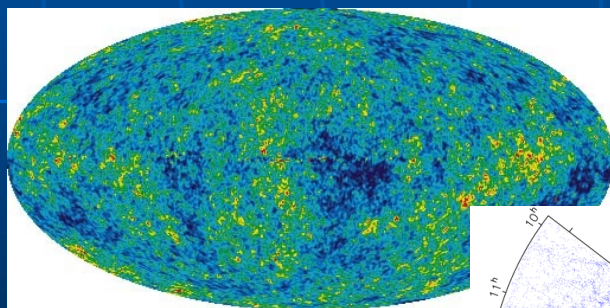
太陽系



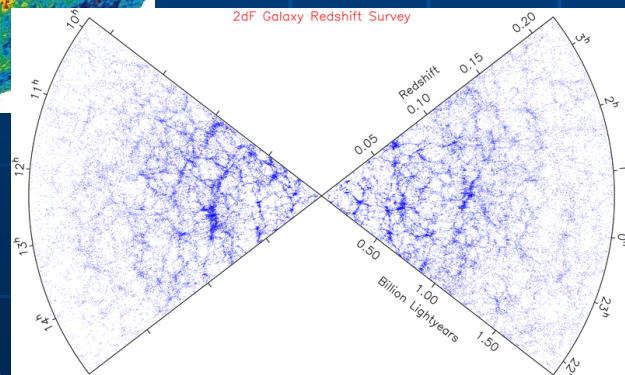
銀河



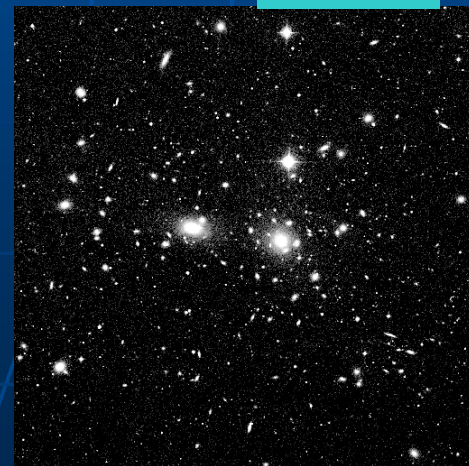
宇宙マイクロ波背景放射



宇宙の大規模構造



銀河団



# 第一部：まとめ

- 宇宙では物は必ずしも一様には分布していない。
- スケール毎に特徴的な構造が見られる。

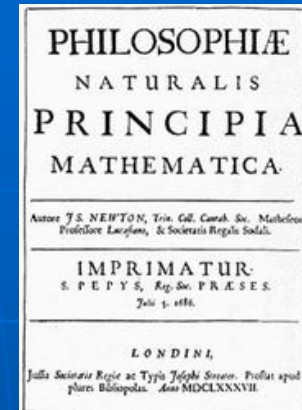
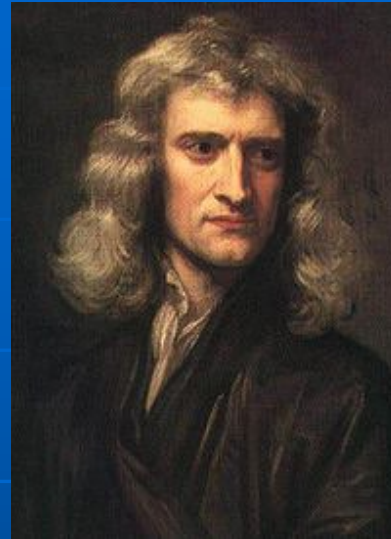
## ——>宇宙の階層構造

- 太陽は宇宙の中では普通の恒星、太陽系は銀河系の“田舎”にある。
- 銀河系は宇宙の中では普通の渦巻き銀河

# 第二部：重力レンズ

# 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」



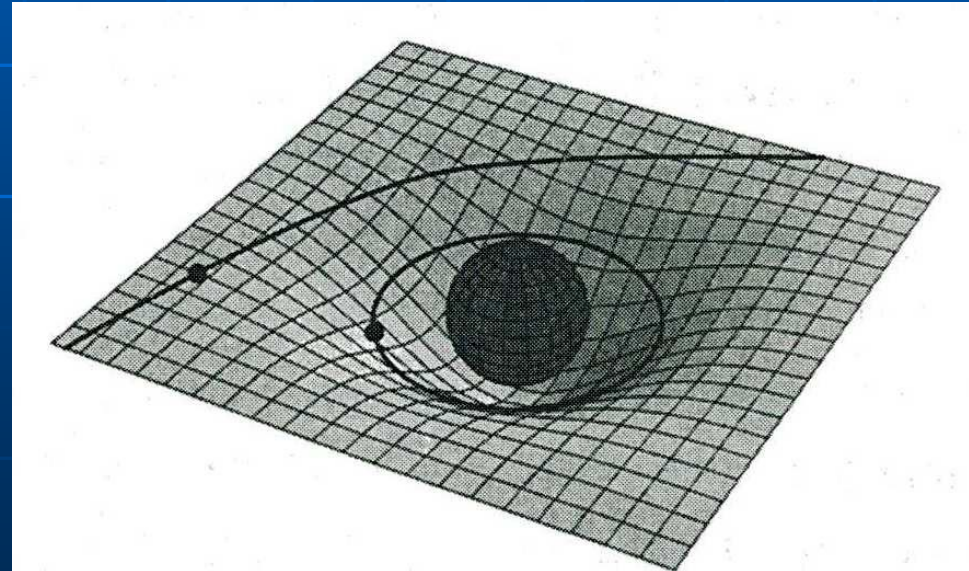
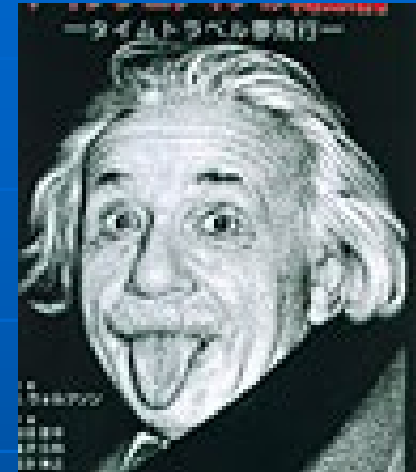
自然哲学の数学的諸原理(1687)





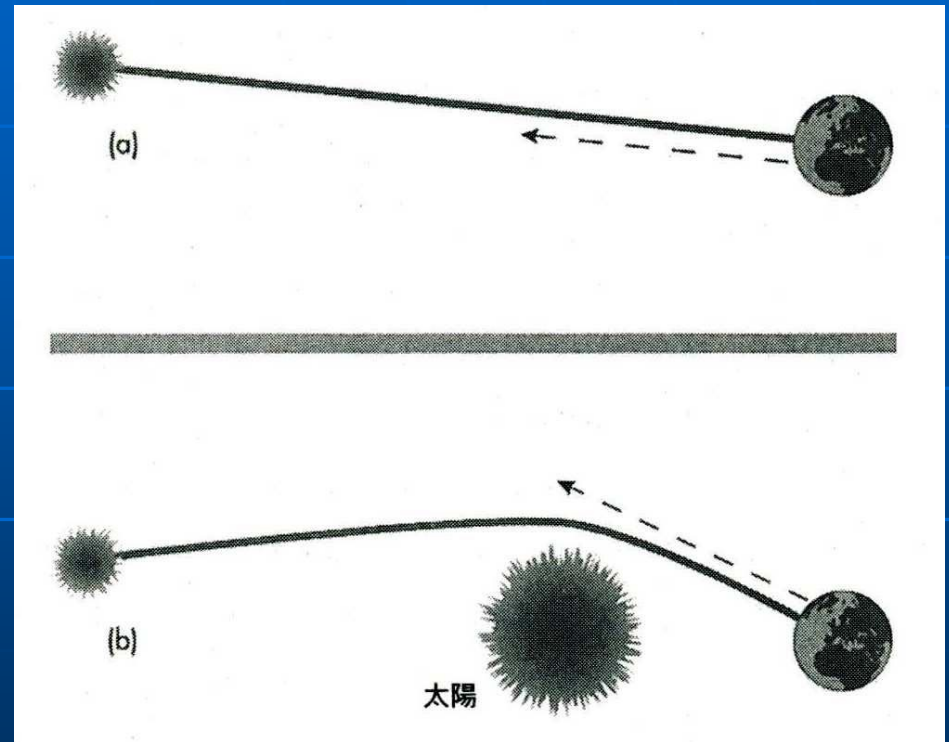
# 重力とは？（アインシュタインの考え）

- 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。
- 離れたところから見ると曲がってすすむように見える。

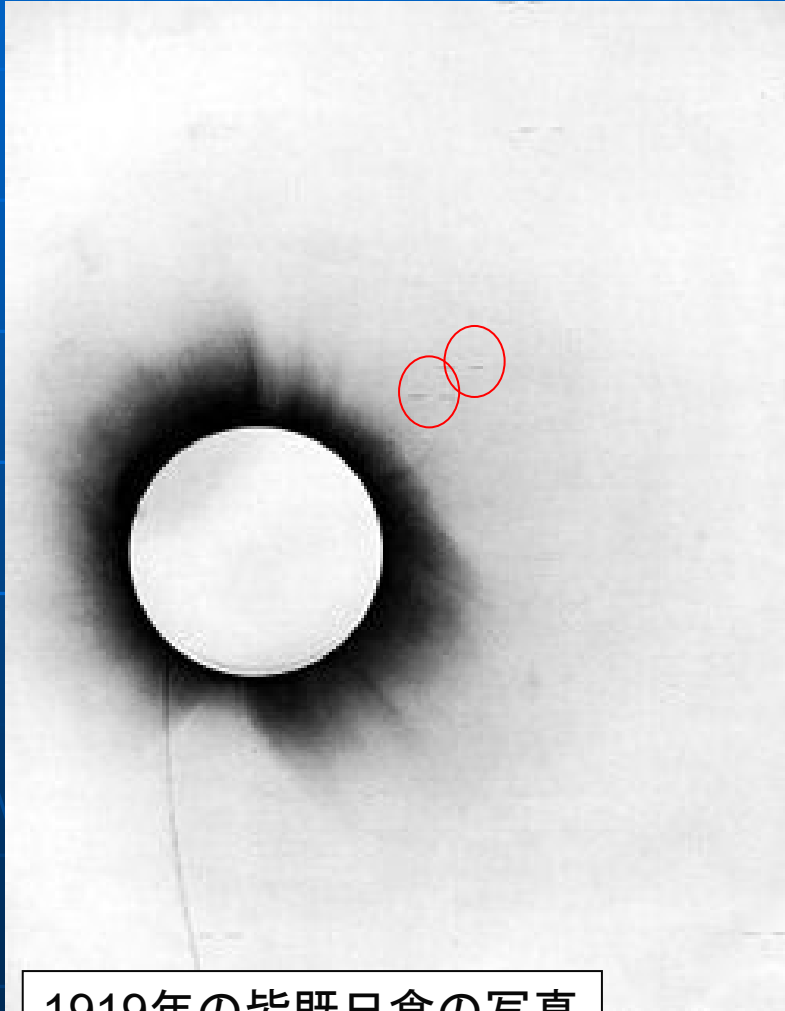


# 光も曲がるんじゃないか？

- 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



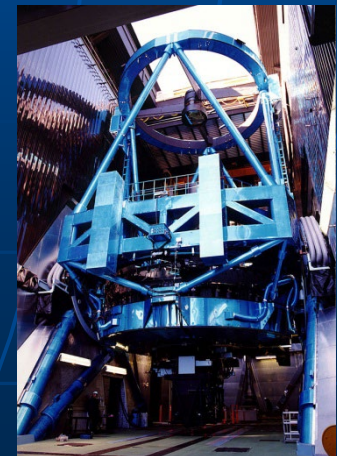
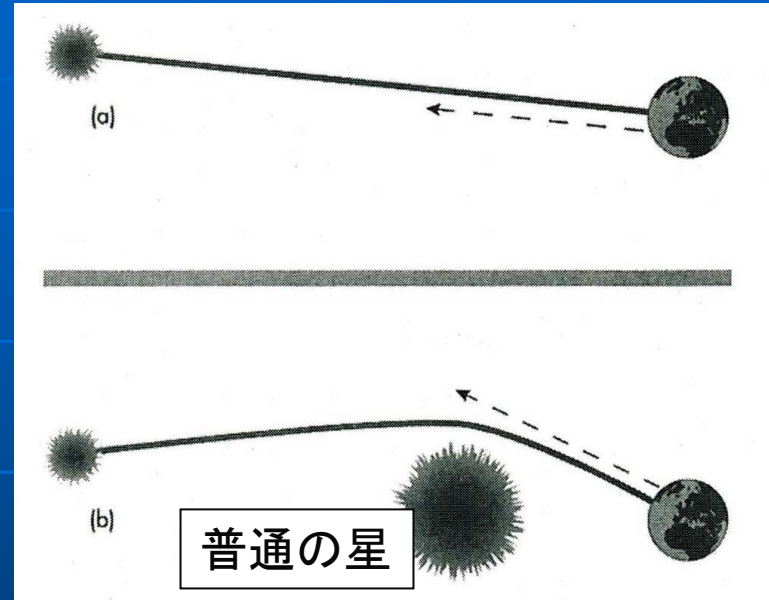
アーサー・エディントン

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

# 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）



# 銀河、銀河団による重力レンズ

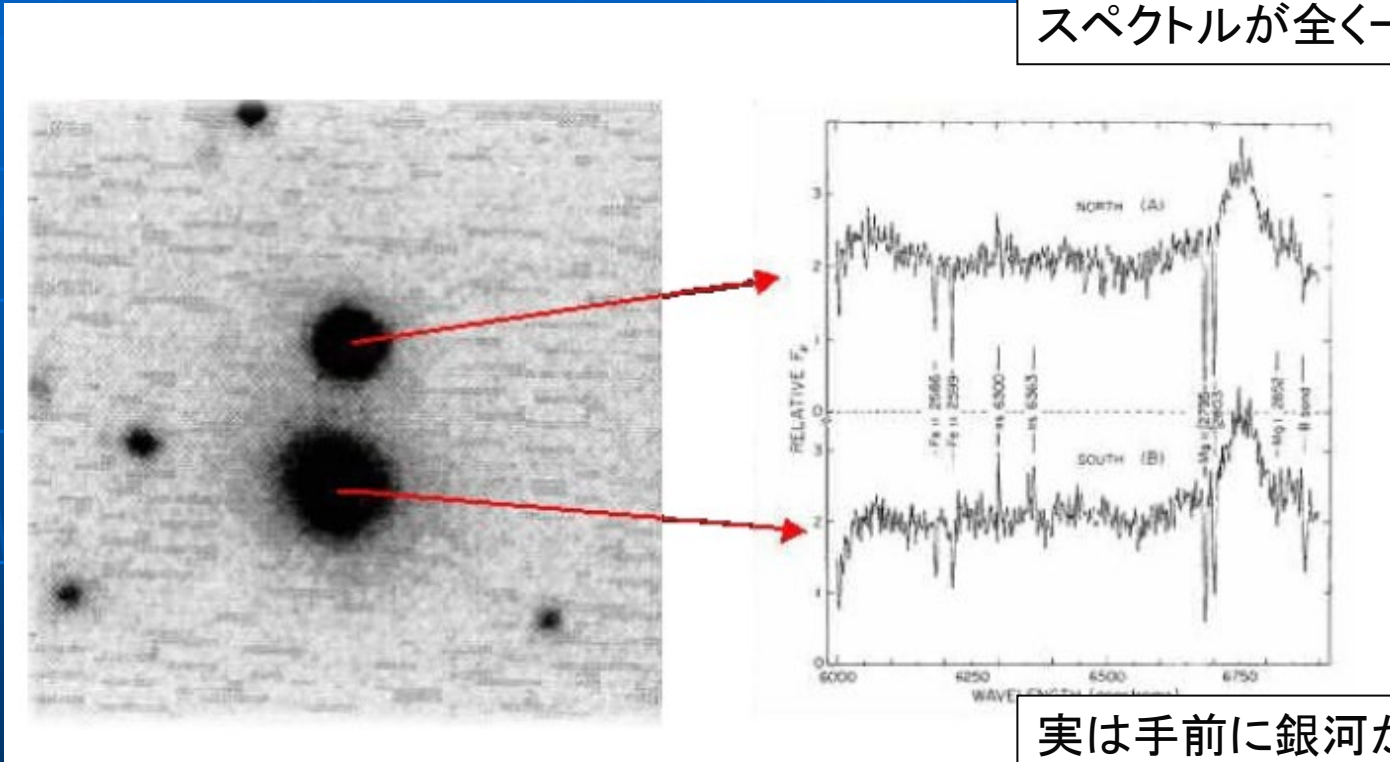


ツビッキー

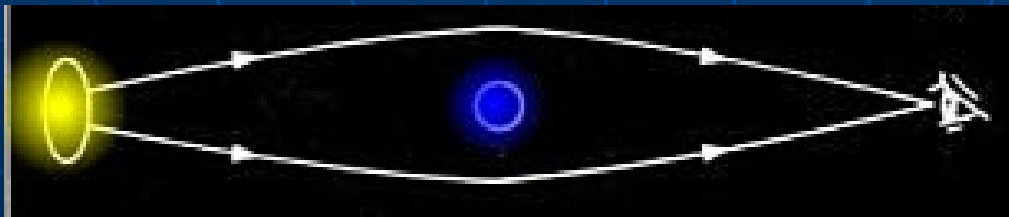
銀河のそばを通る  
光だったら10秒角  
ぐらい曲がるから  
観測可能なんじゃ  
ないか(1973年)

# 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





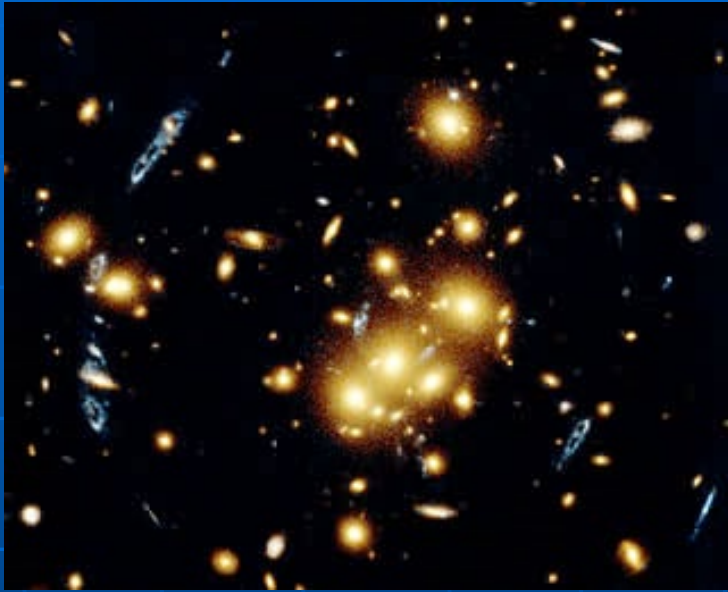
**Galaxy Cluster Abell 2218**

**HST • WFPC2**

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

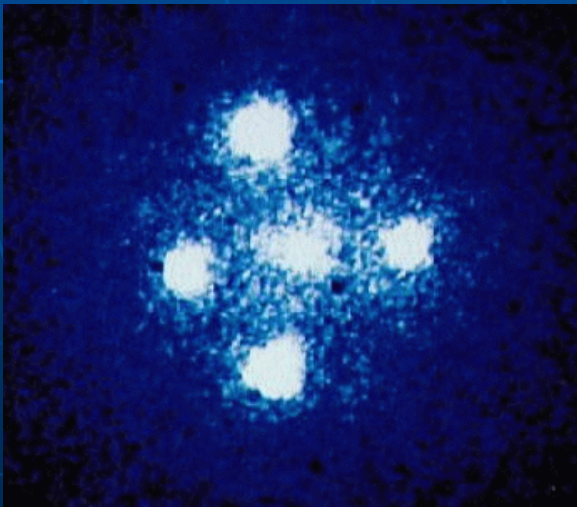
円弧状に見えているのは遠くにある銀河が重力レンズ効果を受けてゆがんで見えているもの

# 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。

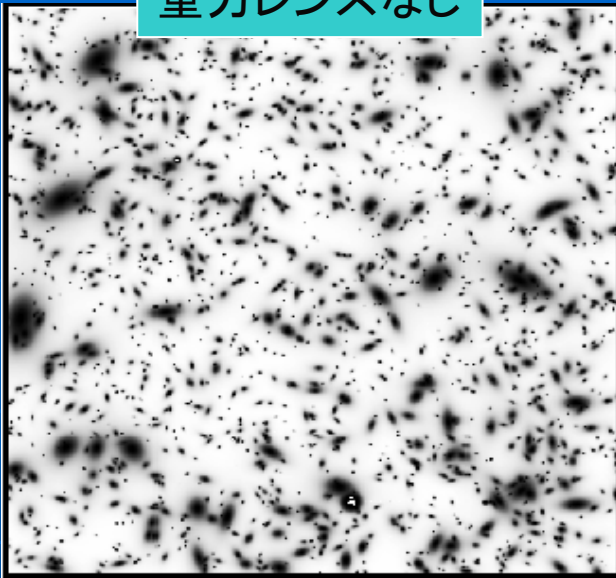
詳しく調べることで光っていない物質（暗黒物質）まで含めた物質の量や分布がわかる



光っている物質の10倍程度の暗黒物質が必要



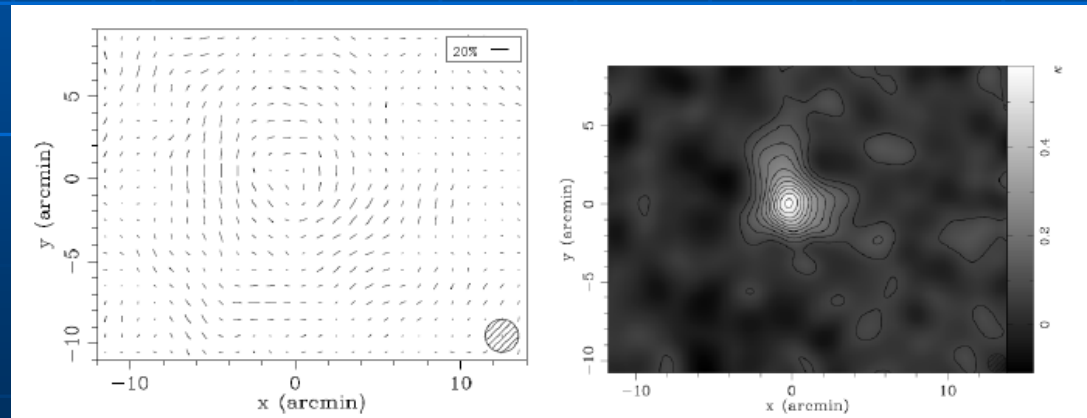
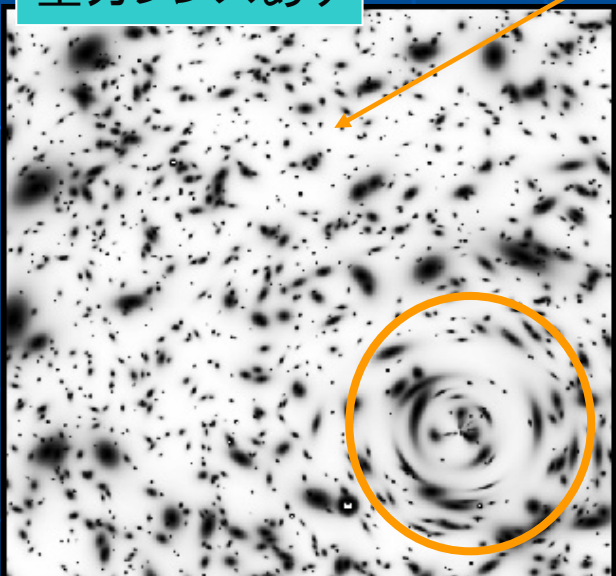
重カレンズなし



# 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う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

重カレンズあり



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探ると



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

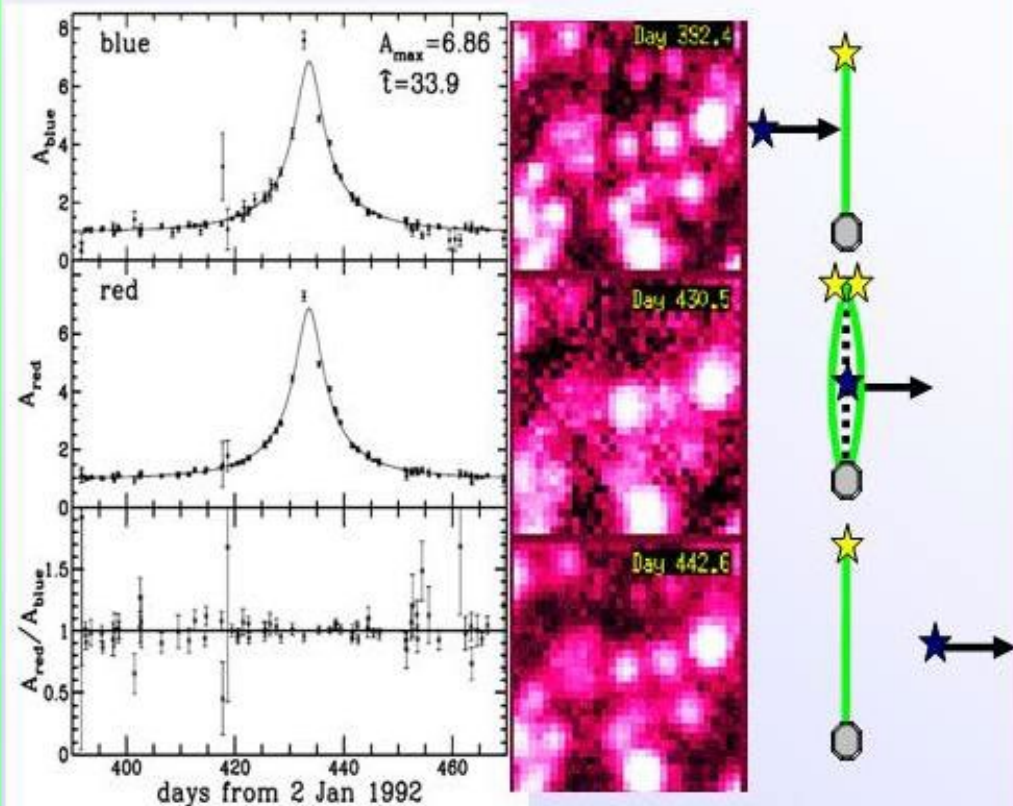
実は光っていない場所にたくさん  
物がある。

# 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
- ムービーもご覧ください。

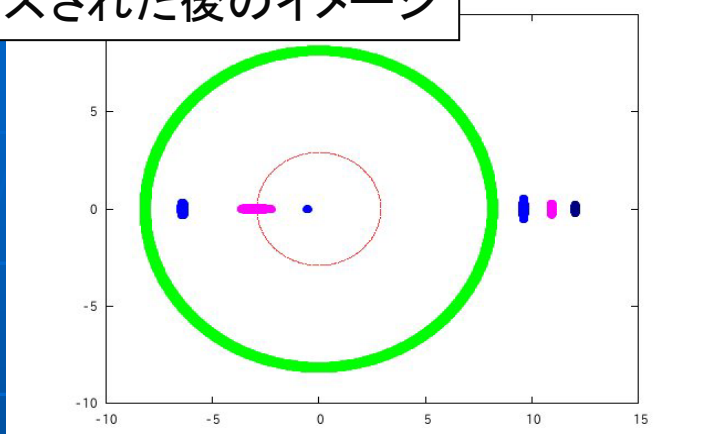
● Microlensing

● 見かけの明るさを大きくする

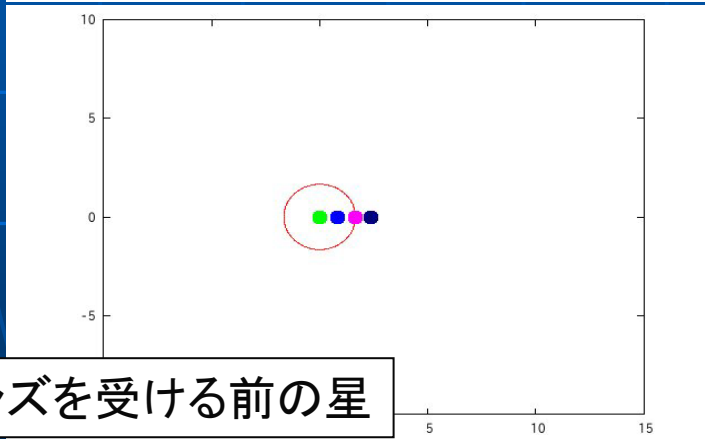


# 山形大学での研究の紹介

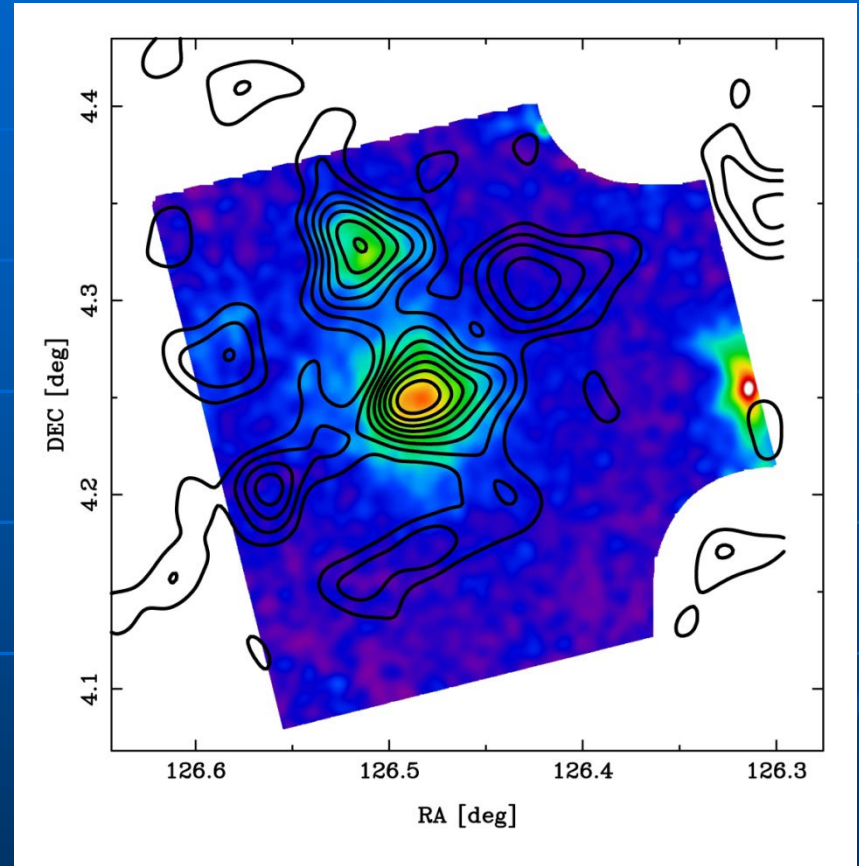
レンズされた後のイメージ



レンズを受ける前の星



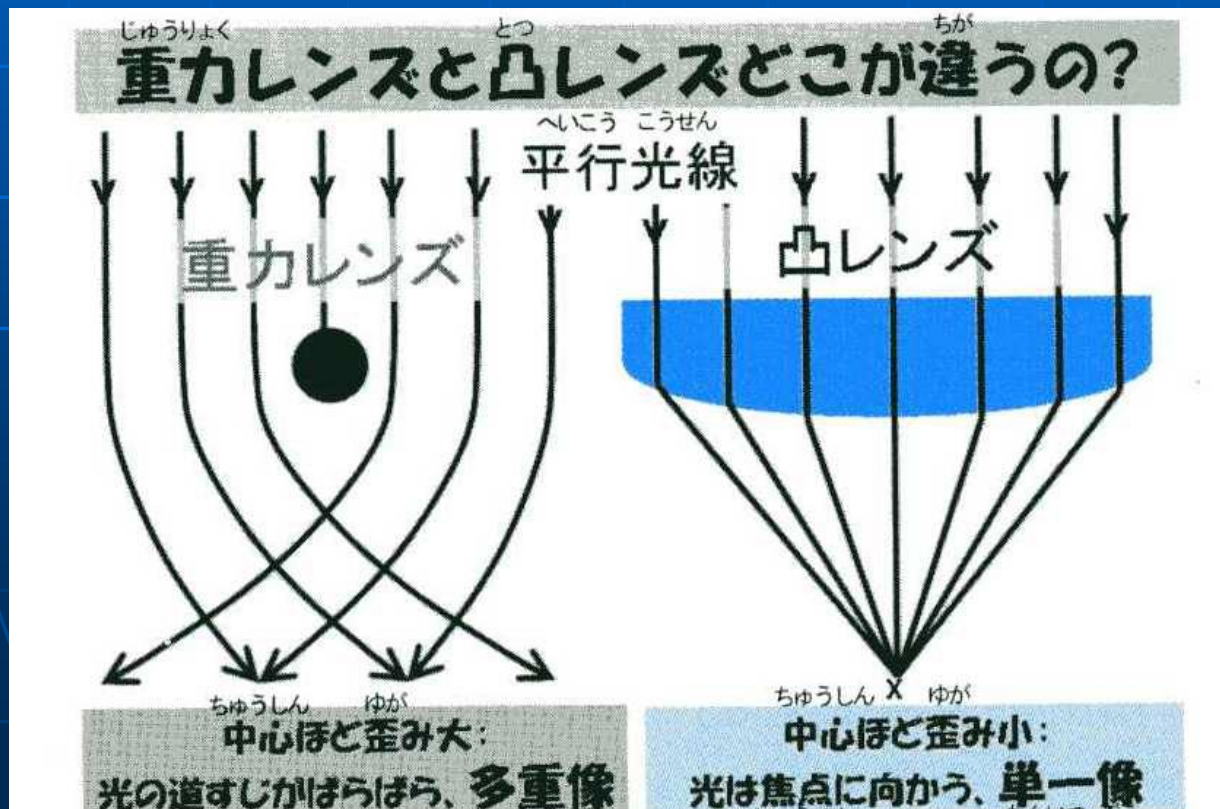
光内君(2008年度修了)  
の修士論文より  
重力レンズの理論計算



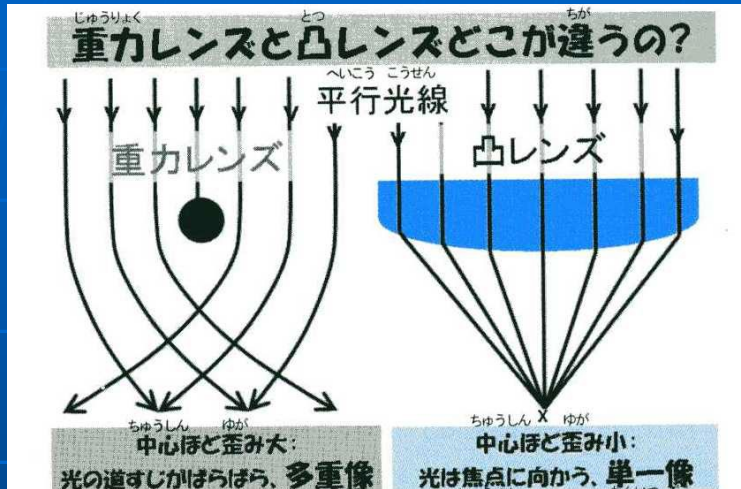
渡邊さん(2010年度修了)が解析した  
観測データ  
等高線: 暗黒物質の分布  
カラー: X線で光っている物質の分布

# 「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



## 第二部：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。