

宇宙の膨張

**Ricardo Moreno, Susana Destua,
Rosa M. Ros, Beatriz García**

International Astronomical Union

Colegio Retamar de Madrid, Spain

Space Telescope Science Institute, USA

Technical University of Catalonia, Spain

ITeDA and Technological National University, Argentina



目標

- 宇宙膨張とは何かを理解する。
- 宇宙には中心がないということを理解する。
- ハッブル-ルメートルの法則を理解する。
- 暗黒物質の検出方法を知る。



紹介

このワークショップで扱う内容は：

- 宇宙の起源：ビッグバン
- 銀河：空間の中を「動いて」いるのではなく空間が広がっている
- ハッブル定数： $v = Hd$
- 中央の国というものが無いように、宇宙に中心がない
- 宇宙背景放射
- 重力レンズ



モデル、予想、検証

テーブルクロスを使った実験



テーブルクロスを非常に素早く引くと、テーブルの上のものは何も倒れないと予想するとする。予想は、検証しないといけない。どうやって検証するか。

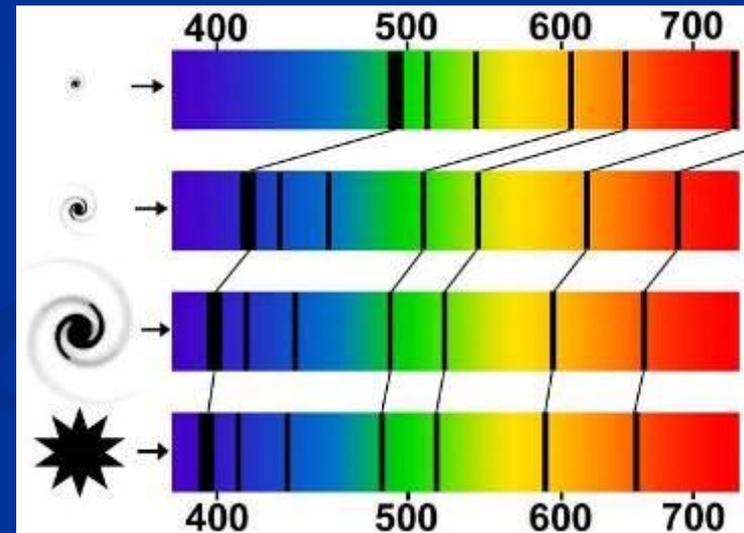
物理学は何が起こるかを予測できる科学なので、実験が有効である：テーブルクロスを素早く引っ張ると摩擦力が作用する時間がないので、テーブルの上の物は倒れない。

私たちが地球上で発展させてきた物理学は、宇宙の他の部分に同じように適用できる。



赤方偏移

- 各元素から放たれた光は輝線を示す。それは線スペクトルであり、各元素に特有のものである。
- 銀河からの光を観察すると、線がスペクトルの赤色方向（長波長側）に向かって偏移し、遠くにある銀河ほどより大きく偏移するのがわかる。
- それは地球から遠ざかる動きの結果であると解釈できる。



赤方偏移

- 近くの銀河では(宇宙膨張による)後退速度が小さく、(空間内での銀河の固有の運動により、総合すると)銀河が後退していないこともある:
大マゼラン雲 +13 km/s 小マゼラン雲 -30 km/s
アンドロメダ銀河 -60 km/s M 32 +21 km/s
- おとめ座銀河団(5000万光年)では、すべての銀河が 1000 ~ 2000 km/s の速度で地球から遠ざかっている。
- かみのけ座超銀河団(3億光年)は、7000 から 8500 km/s の速度で遠ざかっている。



赤方偏移

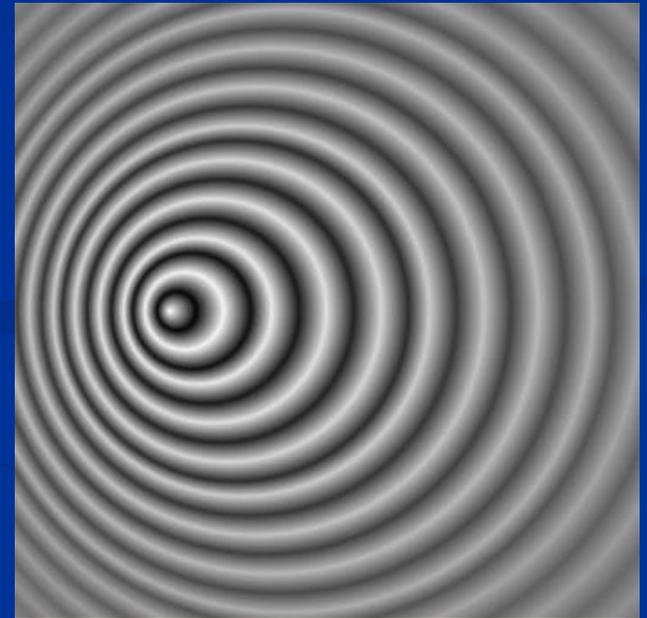
- M 74 は 800 km/s で、その反対方向の M 77 は 1130 km/s で逆の方向へ進んでいる。
- 遠方の銀河を観測すると、遠ざかる速度がさらに速いことがわかる。NGC 375 は 6200 km/s、NGC 562 は 10500 km/s、NGC 326 は 14500 km/s で遠ざかっている。
- 観測方向にかかわらず、非常に近い銀河以外のものはすべて私たちから遠ざかっている。



ドップラー効果

テーブルクロスの実験のように、物理の実験を宇宙の研究に応用していくことができる。

- 救急車、オートバイ、または電車が近づいている時、音程がだんだん高くなり、そして、遠ざかる時には低くなる。
- 音程が高くなる時
 - 波長が短くなっている
- 音程が低くなる時
 - 波長が長くなっている



活動1：ドップラー効果



- 目覚まし時計やブザーを水平に振り回すと、ドップラー効果を聞くことができる。
- 近づく時は波長が短くなり、音程が高くなる。
- 遠ざかる時は波長が伸びて、音程が低くなる。
- バイク、救急車、電車の音でも、同じことが起こる。

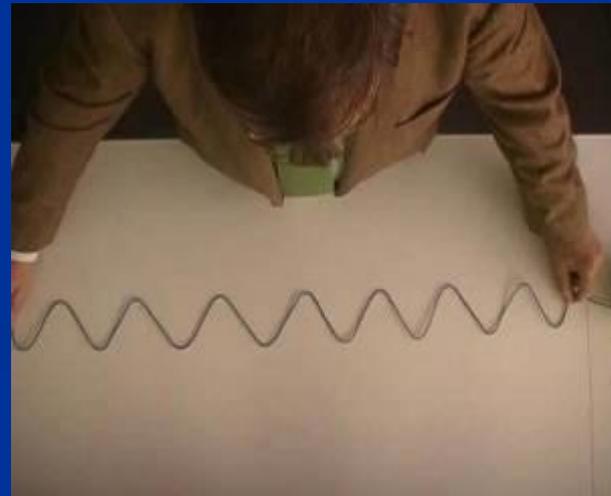


ここで検出したドップラー効果は変位によるものである。しかし、それは宇宙膨張による銀河のドップラー効果とは違うものである。



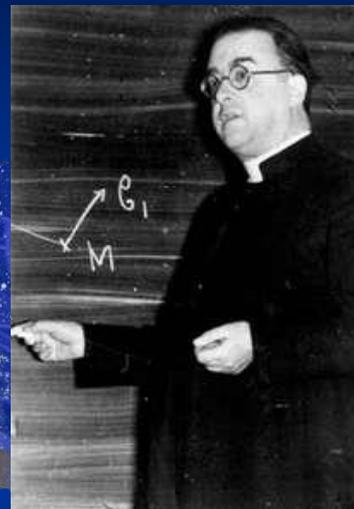
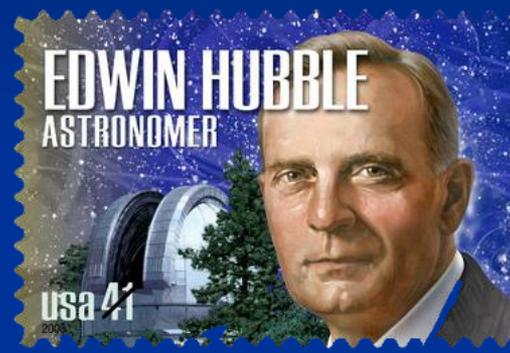
活動2：光子の「引き伸ばし」

- 宇宙が膨張する時、光子の「引き伸ばし」が起こる。
- 家庭用電気機器で使用されているセミリジッドケーブルを使用して、その引き伸ばしのモデルを作成できる。
- 光子の経路が長いほど、より引き伸ばされる。



ハッブル-ルメートルの法則

- 1920年から1930年にかけてジョルジュ・ルメートルとエドウィン・ハッブルは、非常に遠い銀河が近傍の銀河より速く遠ざかっていることに気づいた。



ハッブル-ルメートルの
法則： $v = Hd$



- 銀河が移動するのではなく、銀河間の空間が広がっている。

活動 3 : ゴムバンドの宇宙



活動4：風船の宇宙

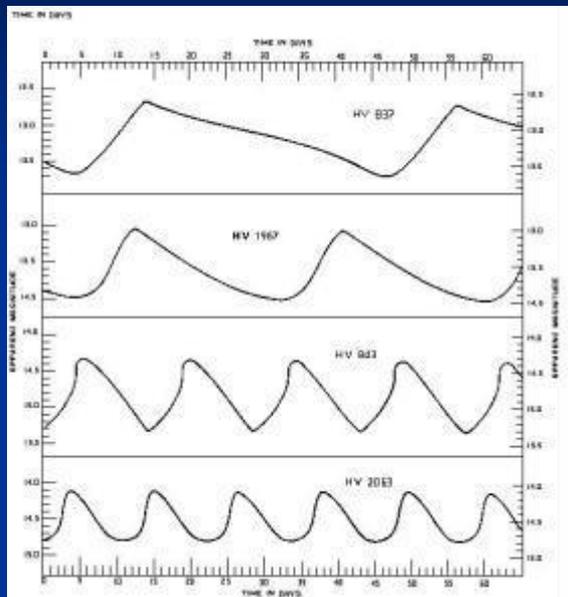


- 風船が大きくなるにつれ、銀河間の距離は広がる。
- 銀河が風船の表面を移動しているのではない。
- この風船上のどの「銀河」にいたとしても、他の銀河がそこから遠ざかるように見える。

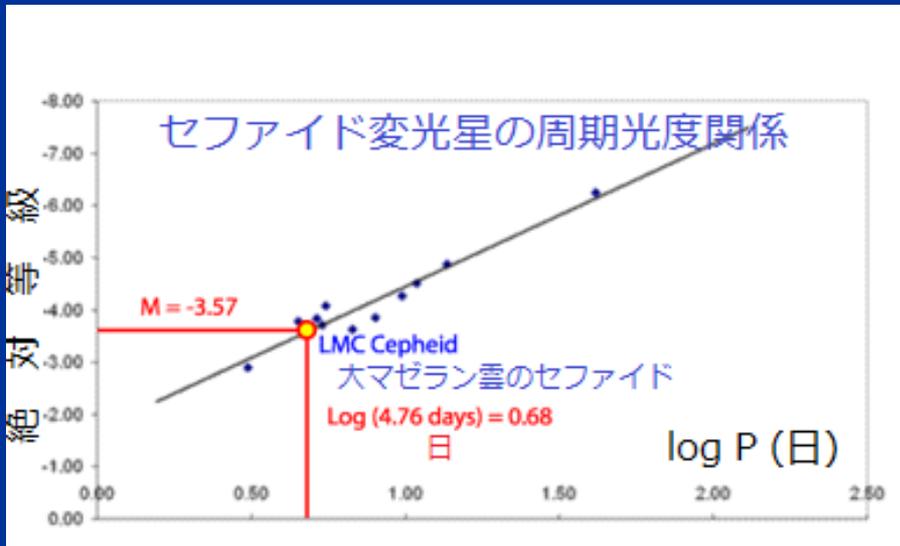
宇宙の膨張

1. 非常に近い銀河までの距離は、セファイド変光星の
周期光度関係から求めることができる。

(20世紀初頭にハーバード大学のヘンリエッタ・リービットによって
発見された。)



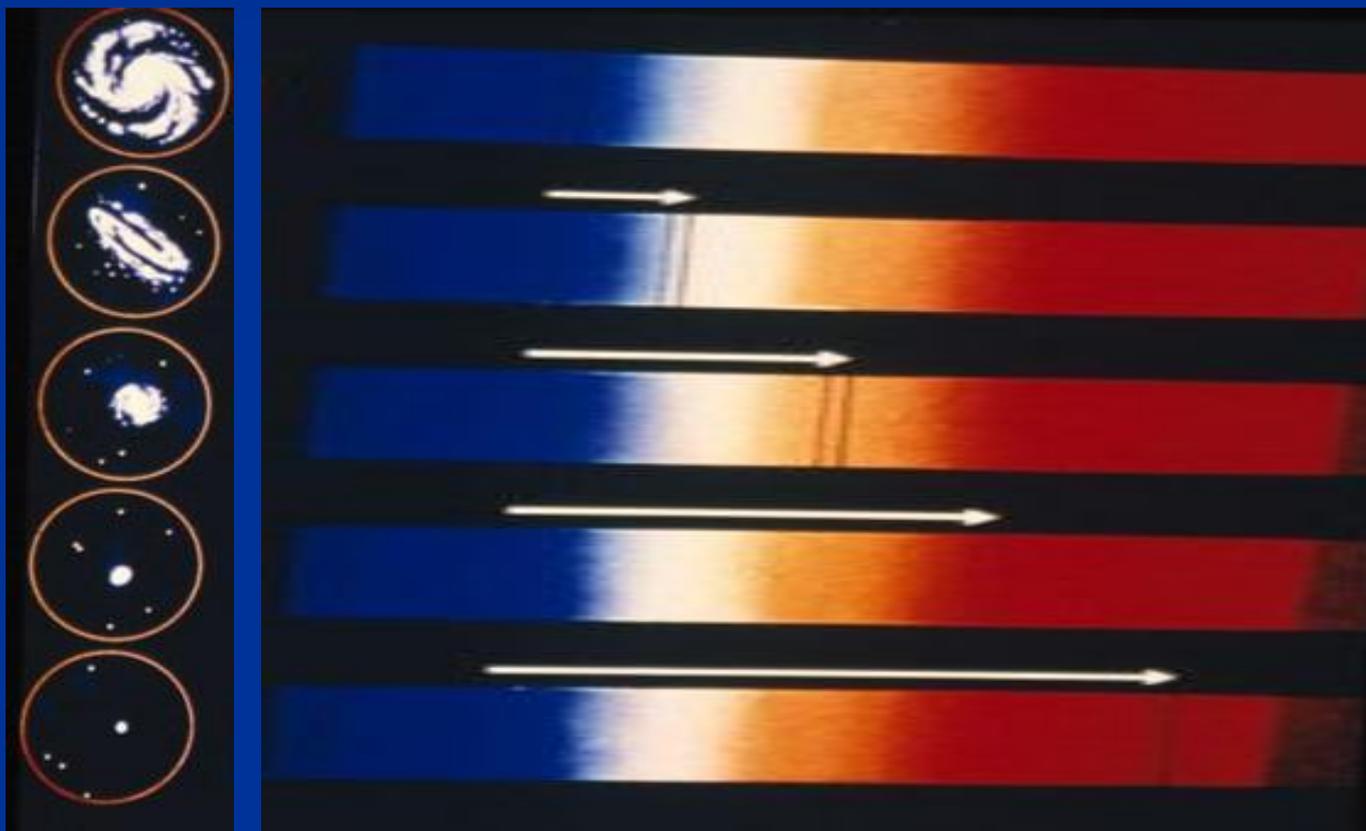
- 光度曲線から周期 P が求まる。
- 周期光度関係から、絶対等級 M がわかる。
- M と見かけの等級 m から、銀河までの距離 d を導くことができる:
$$d = 10^{(m-M+5)/5} \text{ [pc]}$$
- 非常に遠い銀河の距離を割り出すには、ほぼ一定の最大光度を持つ Ia 型超新星を使うこともある。



宇宙の膨張

2. 後退速度は以下の式から、スペクトルで測定される:

$$v = (\Delta \lambda / \lambda) \times c$$



宇宙の膨張

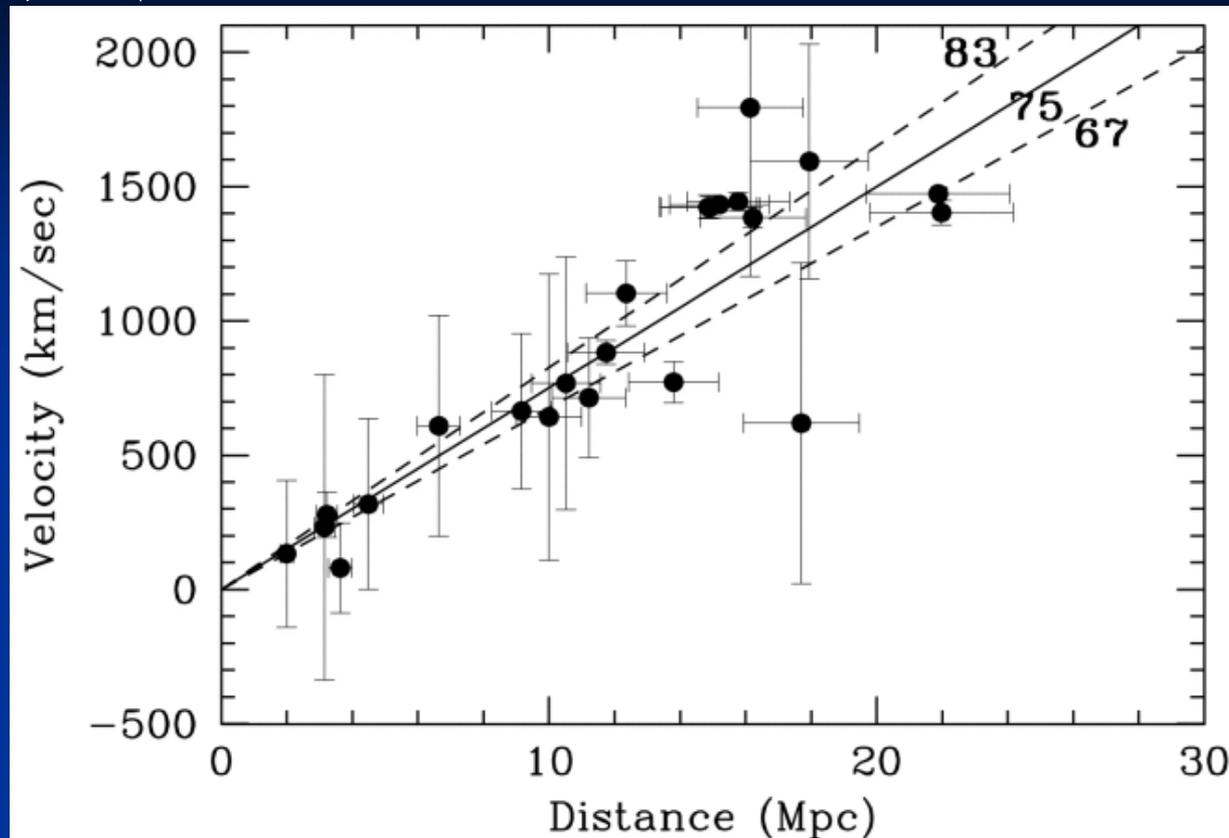


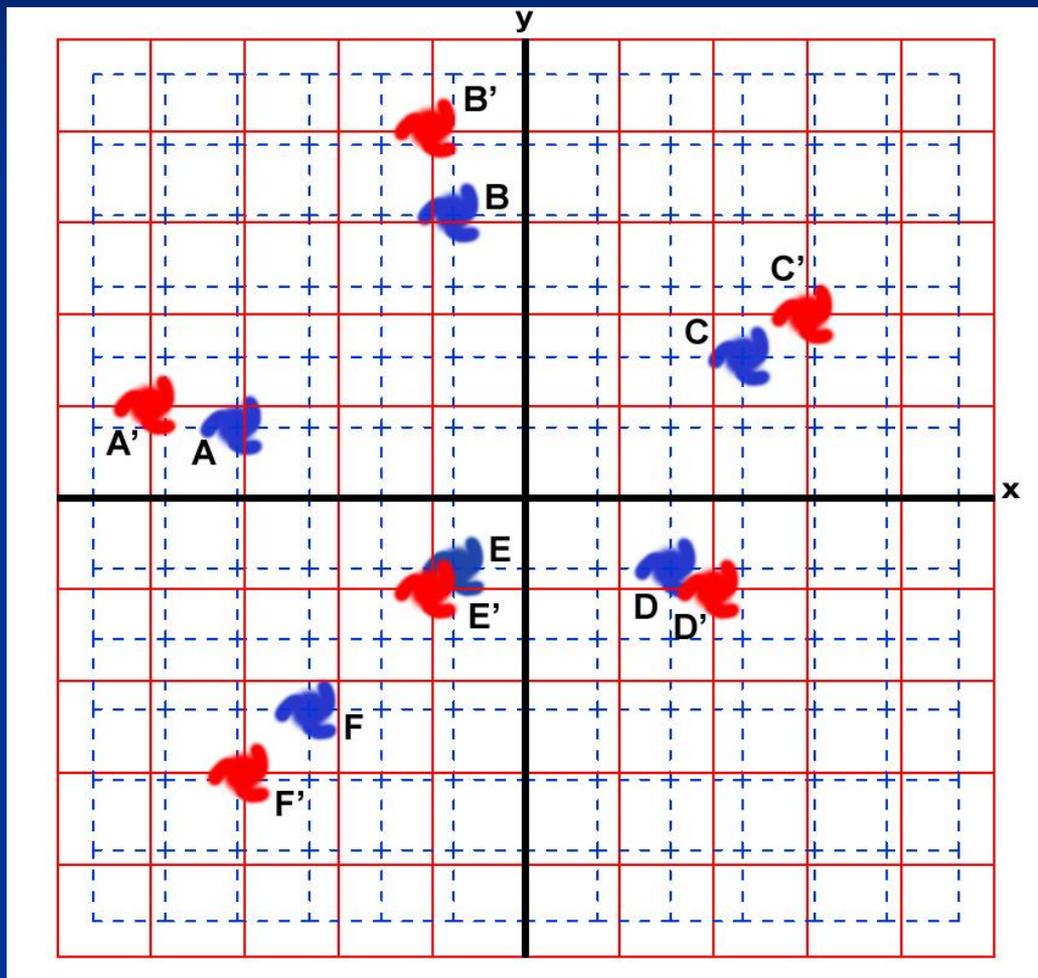
Fig. 1 from Freedman et al, 2001, ApJ, Vol 553, p47.

3. ハッブル定数は次の関係の傾きである: $v = H_0 d$

ここで H_0 は宇宙の膨張率を表す: $H_0 = 72 \text{ (km/s) / Mpc}$



活動5：ハッブル定数の計算

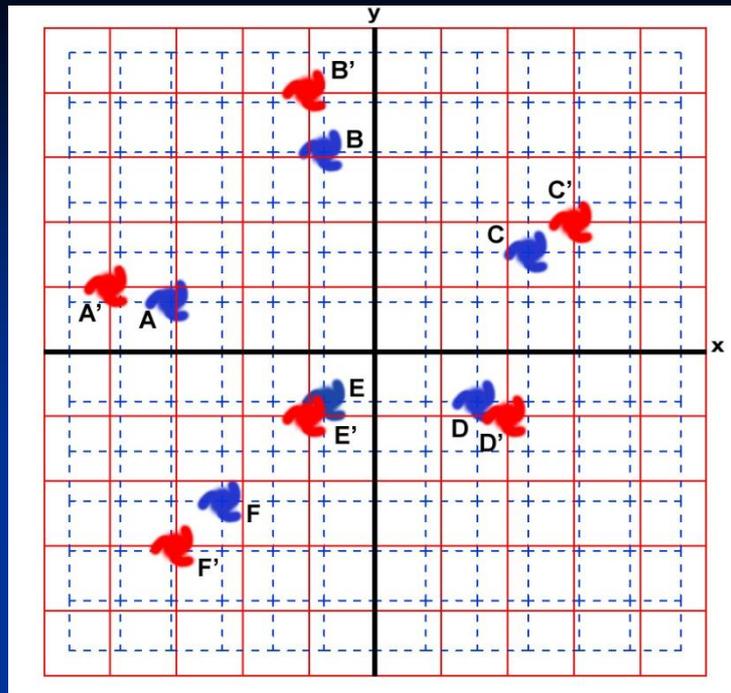


青=膨張前の宇宙

赤=膨張後の宇宙

活動5：ハッブル定数の計算

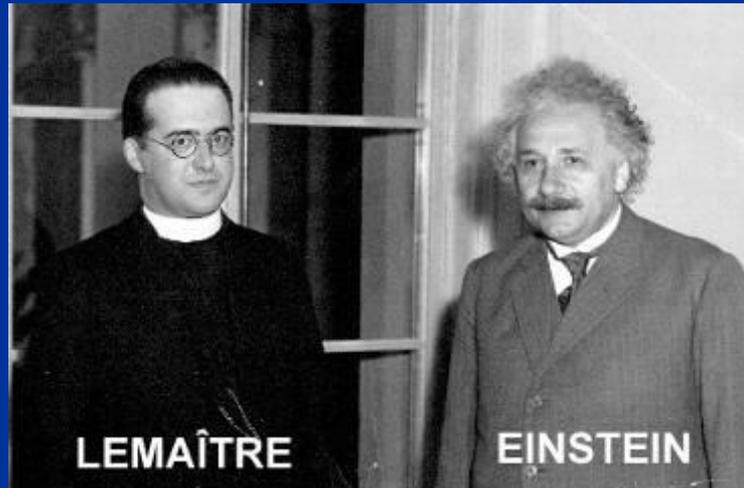
銀河	座標 x,y	$d=$ 原点からの距離	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A					
A'					
B					
B'					
C					
C'					
D					
D'					
E					
E'					
F					
F'					



銀河	座標 x, y	$d =$ 原点からの距離	Δd	$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$	$H = \frac{v}{d}$
A	(-4, 1)				
A'	(-4, 1)				
B	(-1, 4)				
B'	(-1, 4)				
C	(3, 2)				
C'	(3, 2)				
D	(2, -1)				
D'	(2, -1)				
E	(-1, -1)				
E'	(-1, -1)				
F	(-3, -3)				
F'	(-3, -3)				

ビッグバン

- 過去には、すべてがひとつであった時があった：
膨張する宇宙
- ジョルジュ・ルメートルは、相対論の方程式を解くことで、宇宙が「原子の卵宇宙」から始まり膨張するという宇宙論を提唱した。



ビッグバン

- ビッグバンとは、大爆発の印象で名付けたものである。
- 宗教的な見方に反対意見を持っていたフレッド・ホイルは、それが創造主という思想とあまりにも通じているようだと思った。
- 天文雑誌スカイ・アンド・テレスコープは名前を変更するためのコンテストを行った。1万2000の提案があったが、どれも良くなかった。



ビッグバン

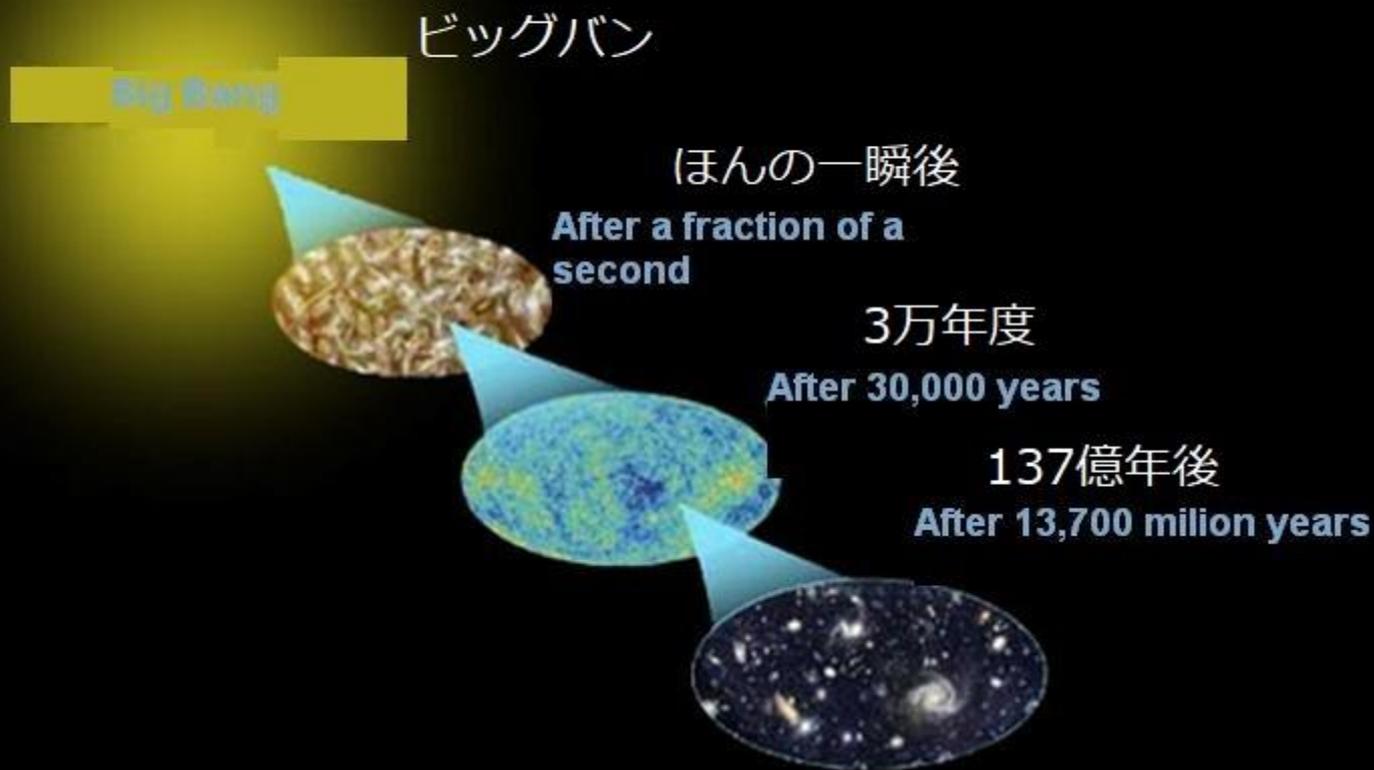
- ビッグバン前は？ 私たちは何もわからない。
- 原因は何か？ なぜそれが起こったのか？ 観測された物理法則が、なぜどこでも通用するのか？
- 物理学は、存在するものがどのように働くかについて研究する学問であり、存在理由を扱うのは難しい。
- 物理学は、その起源（ビッグバン以降）からの問題を研究するのであって、ビッグバン以前や、なぜ存在するのかの理由や目的を研究することができない。それらは哲学的そして宗教的な問題であるが、科学的には設定が難しい課題である。

ビッグバン

- 量子真空のゆらぎ？
- 空虚は無ではない、存在するものである。
- 多元宇宙？どう検証できるのか。



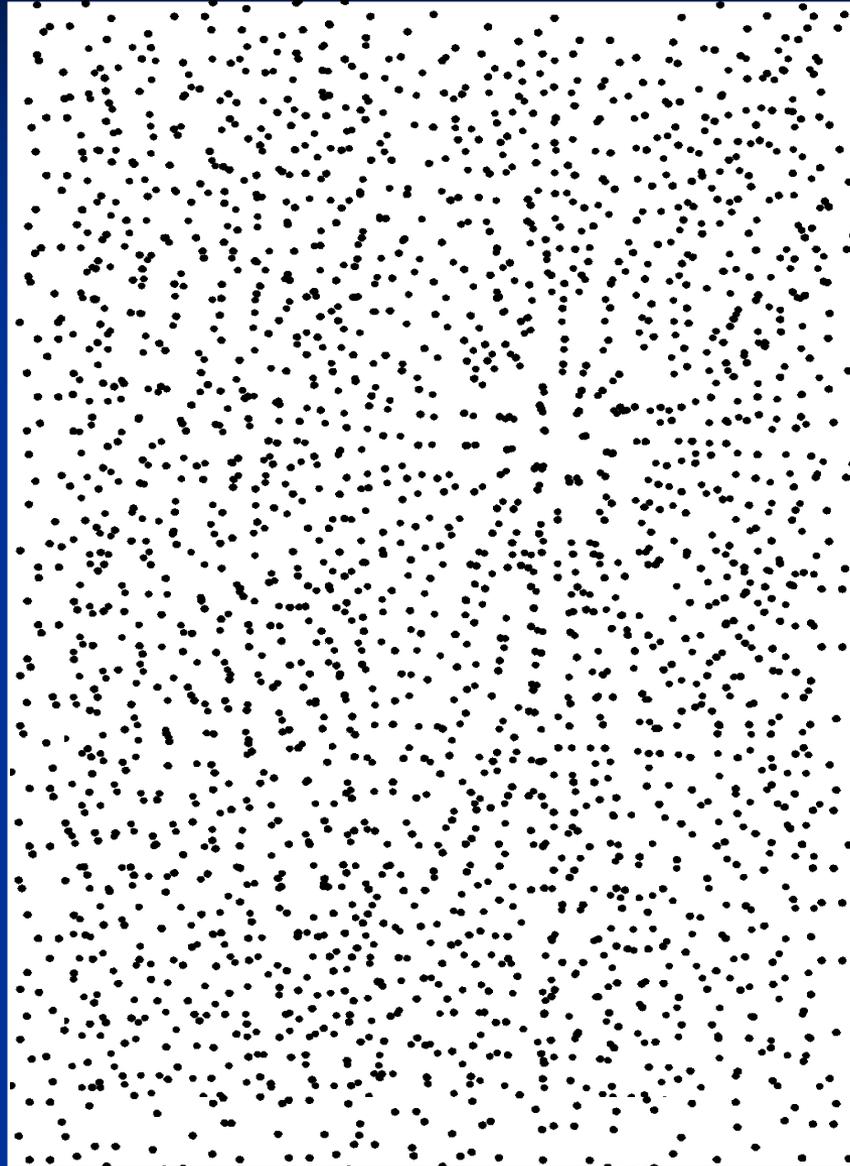
宇宙の生い立ち



宇宙の進化カレンダー



活動6：中心のない宇宙膨張

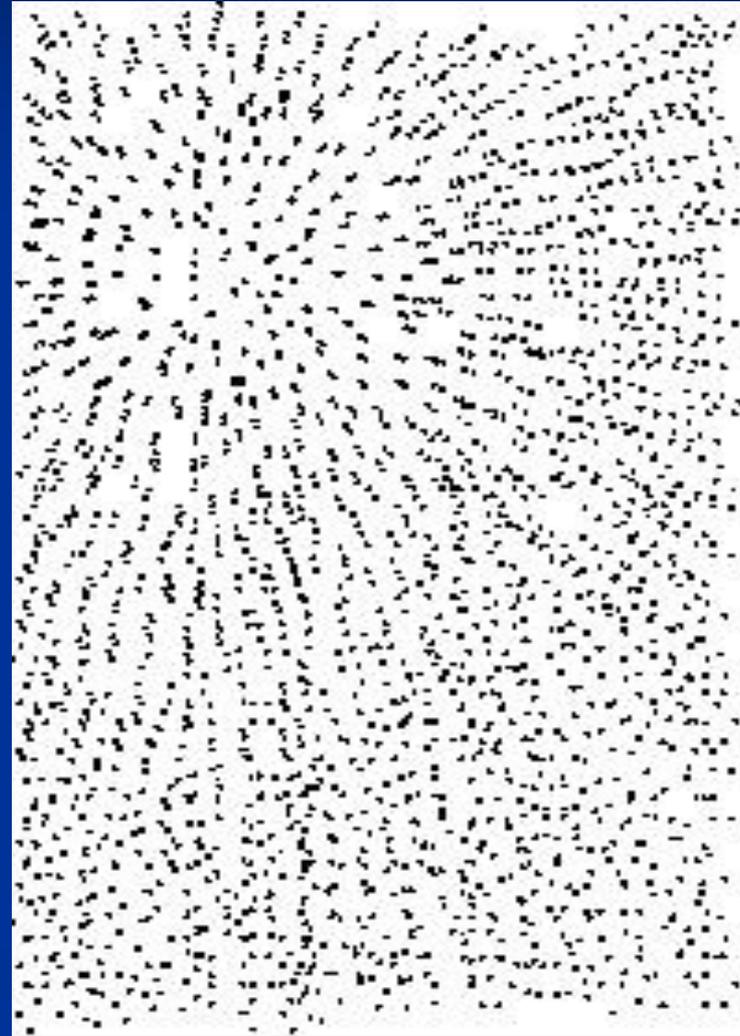
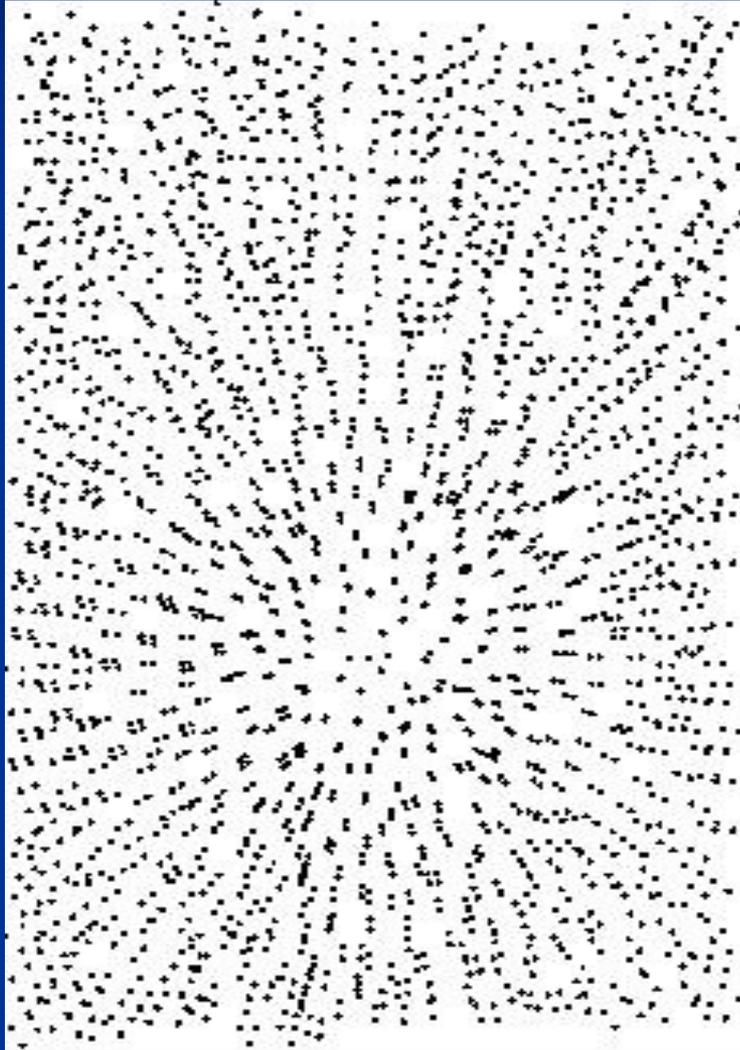


100 %

105 %



活動6：中心のない宇宙膨張



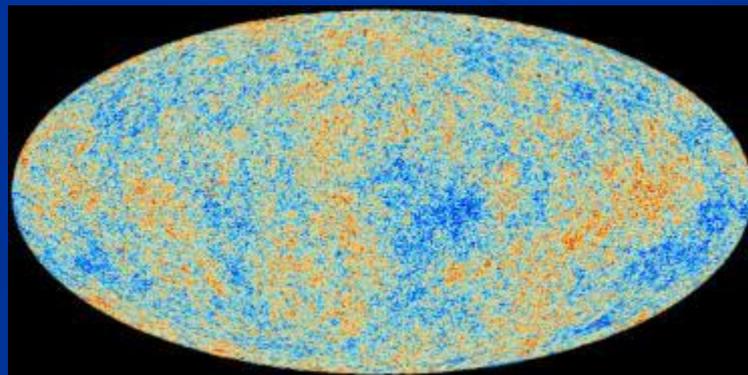
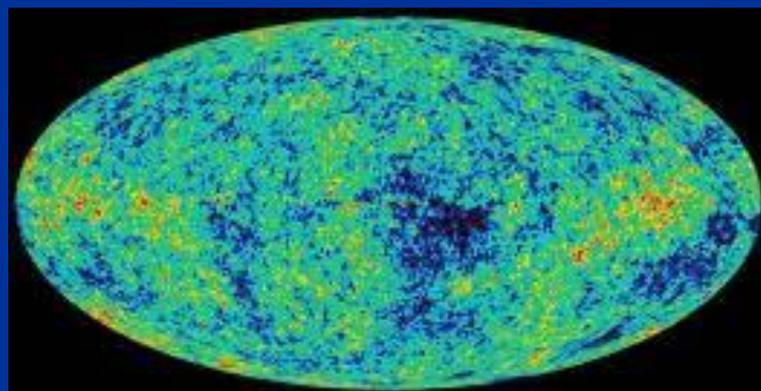
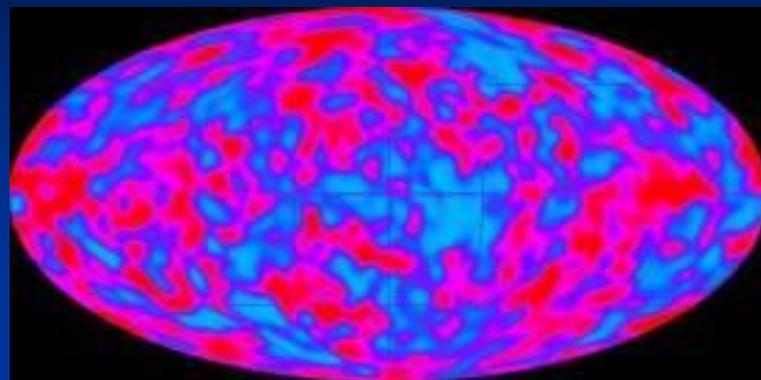
宇宙マイクロ波背景放射（CMB）

- ビッグバンから38万年後に放たれた放射。
- 時間の経過とともに空間が膨張し、CMB光子の波長も伸びた。
- 現在はマイクロ波帯に属する波長になっている。



宇宙マイクロ波背景放射（CMB）

- COBE、WMAP、Planck の各科学衛星は、毎回、より詳細に宇宙マイクロ波背景放射の天球図を作成した。銀河を形成し始める物質の塊と思えるような小さなゆらぎを検出した。

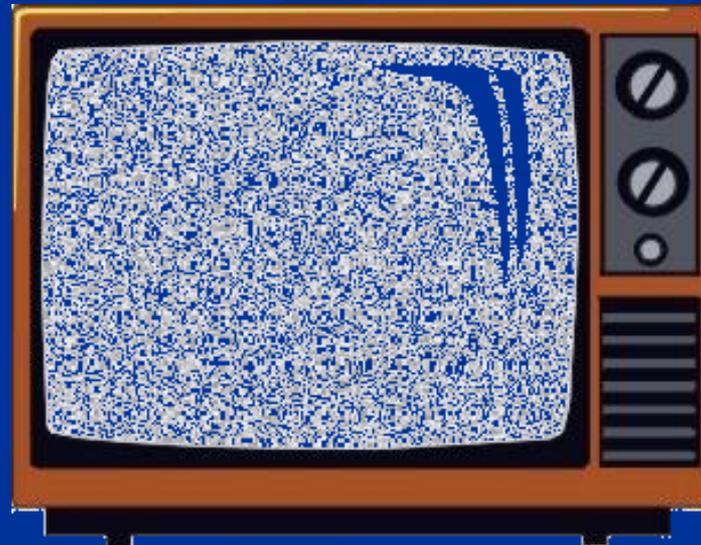


活動7：宇宙背景放射

- ビッグバンから30万年以上経つと、光子は物質との強い相互作用から分離され、宇宙を自由に移動し始めた。
- 空間膨張により、光子はその波長を伸ばしていき、現在、波長 $\lambda = 2 \text{ mm}$ 、温度に換算して：
 $T = 2.7 \text{ K} = -270 \text{ }^\circ\text{C}$

活動7：宇宙背景放射

宇宙背景放射は、アナログテレビで検出できる。放送のないチャンネル（訳注：砂嵐）では、10個の点のうち1つはマイクロ波背景放射によるものである。周波数を外したラジオの雑音でも、同じ効果を聞くことができる。



暗黒物質：地上の引力を打ち消すように振り回してみよう

ブラックホールそのものは目に見えないが、重力で恒星系をその周りに引き寄せていることにより存在が明らかになる。



暗黒物質は見えないが、それを検出する一つの方法は、その近くの物体や銀河内の動きを観測し研究することである。

暗黒物質を検出する別の方法： 重力レンズ



重力レンズの質量は、周囲の空間を歪め、遠くの天体からの光を屈折させる光学レンズのように機能する。

重力レンズ

- 光は常に最短経路をたどる。
- 曲面ならば、光の軌道は曲線である。

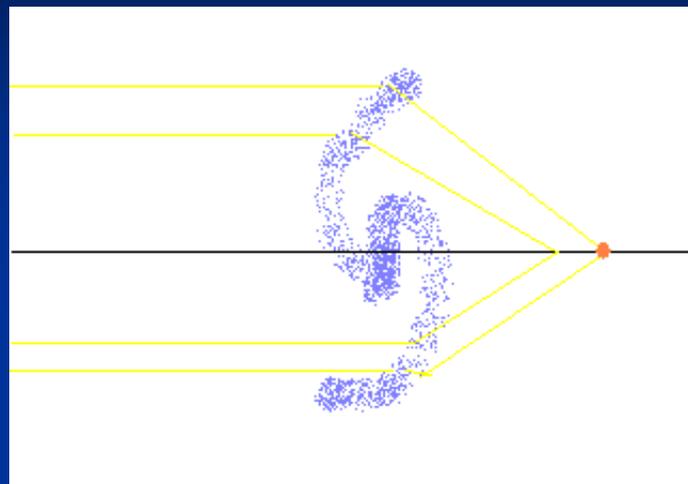
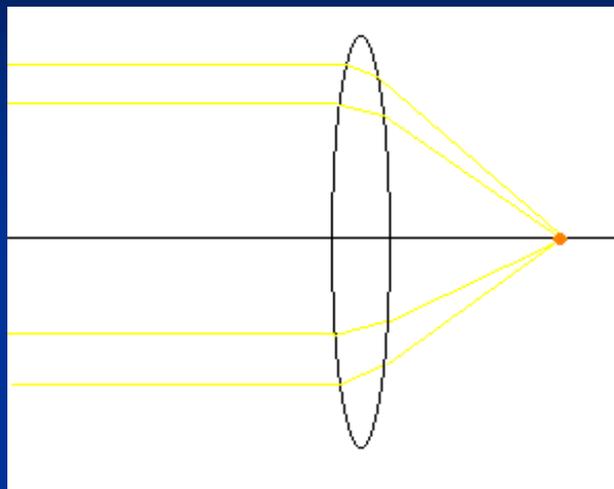


光が天体の近くを通過する時に 曲がるのはなぜか

- 質量がある場合、空間は曲がり、2点間の最短経路は曲線になる。
- 地球儀で、同様の状況を確認される。

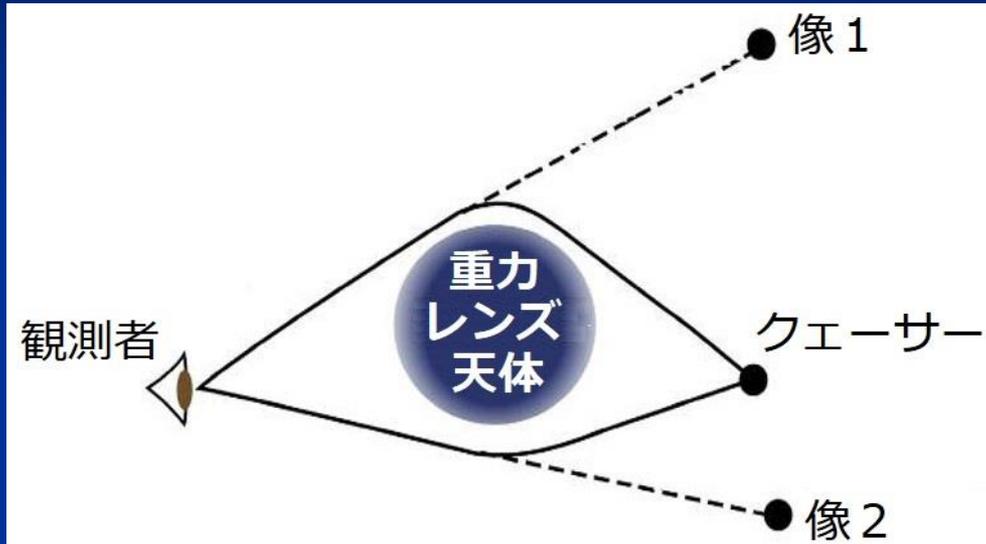


重力レンズはどのように作用するか



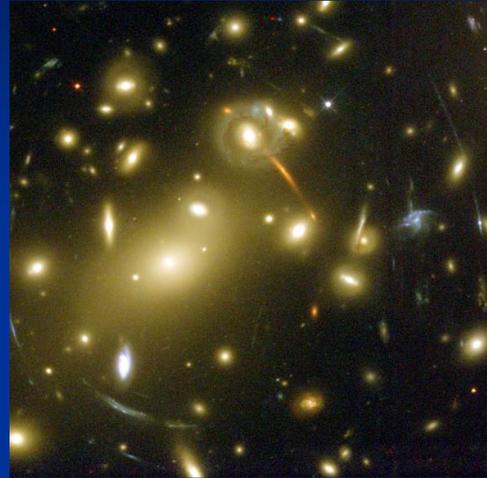
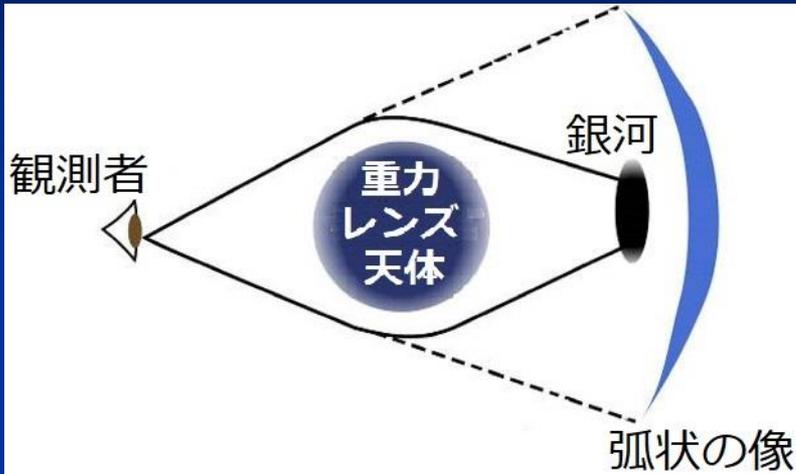
- 凸レンズは平行な光を1つの点、つまり焦点に集める。
- 銀河や銀河団、銀河団などによる重力レンズは、光を点ではなく線状に収束させる。これにより、歪んだ複数の画像を生じさせることがある。

位置の変化と増光



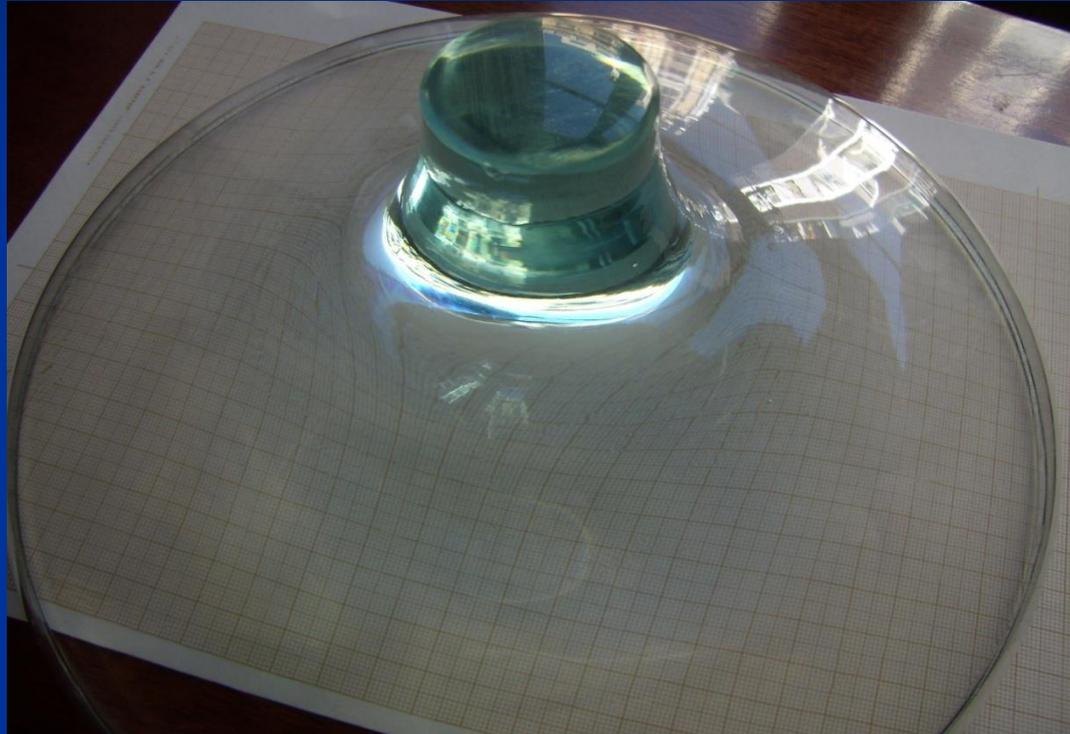
- 屈折によって星、銀河、またはクエーサーの見かけの位置が変わる。
- 重力レンズは完璧ではなく、大きなものは複数のレンズ像を作る。

変形



- 屈折した天体が広がった光源である場合、像は明るい円弧を作る。
- 重力レンズ天体が完全に対称的であれば、光線は収束し、環状になる：アインシュタイン・リング。
- 屈折した天体が星またはクエーサーの場合、像は点になる。

活動8：ガラスの足の部分による 変形の実験



- ウィングガラスの足の部分をグラフ用紙の上に置くと、グラフ用紙のラインが変形して見える。

活動8：「ガラスの底」を通して見る



- グラスの底だけを切り取る。



+



=



円弧の破片

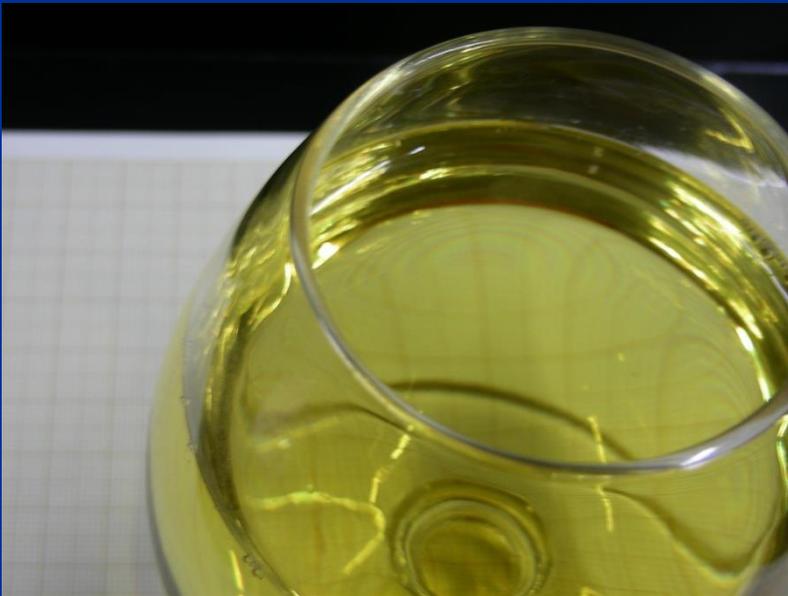


アインシュタインクロス



アインシュタインリング

活動9：グラスワインによる 空間変形の実験



- 白ワインを注いだグラスをグラフ用紙の上に置き、ワイン越しに覗くと、グラフ用紙のラインが変形するのがわかる。

活動9：懐中電灯を固定し、 ワイングラスをのぞきながら ゆっくり動いてみる



- この単純な模型は、「物質」が、それを通して観察される像を歪めることを再現している。
(ワインの代わりに他の透明液体でもよい。)

活動9：懐中電灯を固定し、 ワイングラスをのぞきながら ゆっくり動いてみる



円弧の断片



まとまりのない像



アインシュタインクロス

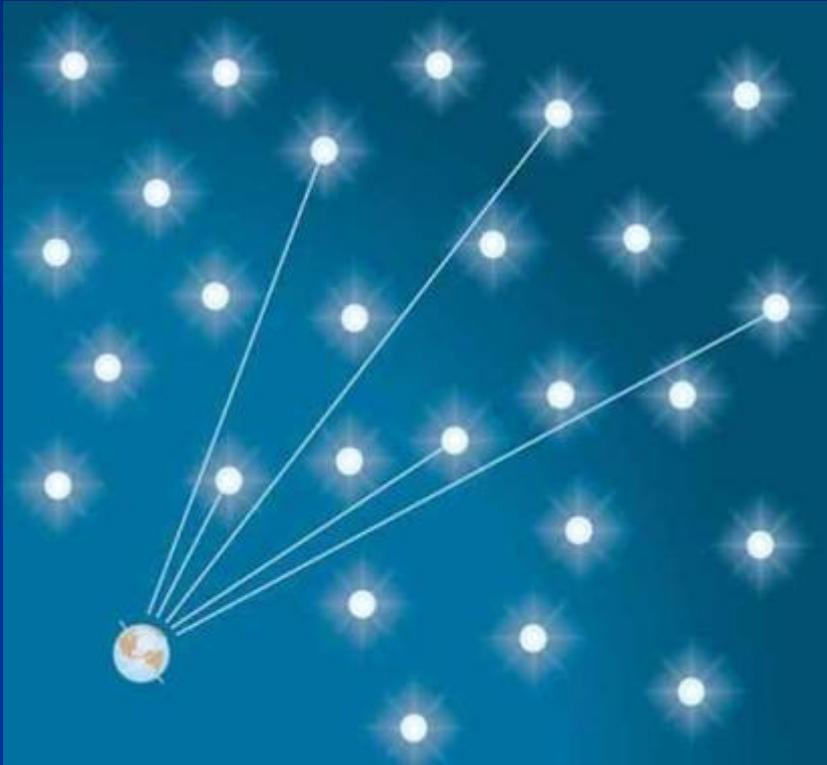
夜はなぜ暗いのか

1923年、オルバーズが指摘するには：

- 宇宙の大きさは無限で、
- 星は宇宙全体に一様に分布していて、
- すべての星は宇宙の中で同じような輝きを放っているならば...



発展的課題 なぜ夜は暗いのか？



無限の宇宙には無数の天体が存在するので、
夜は明るくなるはずである。

夜はなぜ暗いのか

そうすると、

- 遠くの星の輝きで埋められているので、空のどの点も黒ではなく明るくなるはずである。
- 距離 r 離れた、空の各「玉ねぎ層」の星の数は r の2乗に比例し、星ひとつの明るさは逆に反比例する。各層が地球に同じ量の光を送ることになる。もし無限に層が続くのならば、空は夜でも明るくなるはずである。

夜はなぜ暗いのか

どこかが間違っている：

- 宇宙膨張により、見える宇宙に限界がある。
- しかし何よりも、空は永遠の年齢を持っていないために星の層も無限に続いておらず、量的に星の表面が空を埋めることはない。

エドガー・アラン・ポーは1848年発表の散文詩「ユリイカ」で、この現象を正しく記している。
夜空は暗くていいのである。



ありがとうございました

