



# 光の速さ

—宇宙の物差し・光速を測る—

竹下徹 信州大学

県ヶ丘高等学校

23 July 2019



信州大学  
SHINSHU UNIVERSITY

光  
光の速さ  
宇宙  
光速を測る



3秒以内はあぶない!???



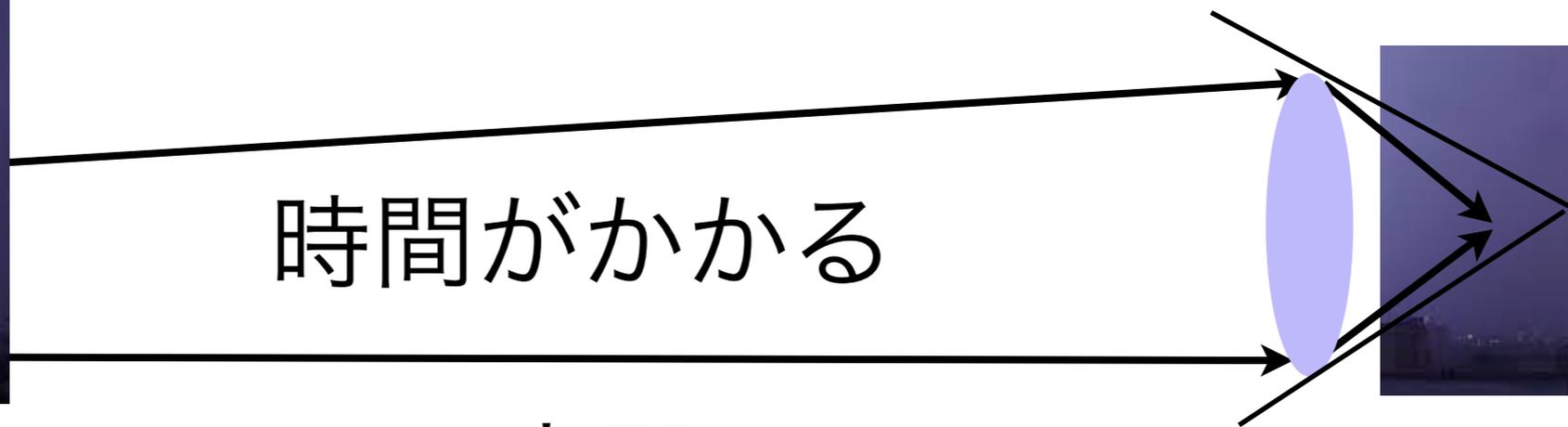
# 光ってなんだ？



- 人が見る、聞く
- 光を出す元、目 = 音を出す元と耳

音のもと

音は遅い：遅れて到着



時間がかかる

空間

光のもと

目

光の時間は0か？

光の速さは無限大か？



# 光速の測定

- ブラッドレー：天文：光行差

1725

$$c = 3.01 \times 10^8 \text{ m/s}$$

- フィゾー：回転歯車

1849

$$c = 3.153 \times 10^8 \text{ m/s}$$

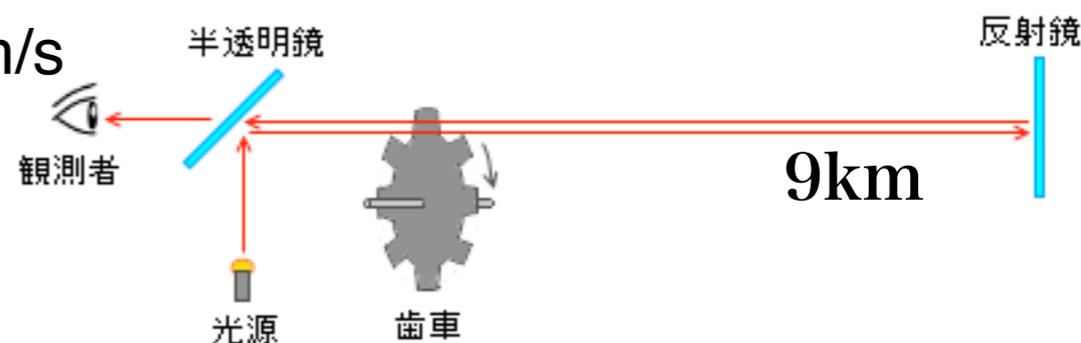
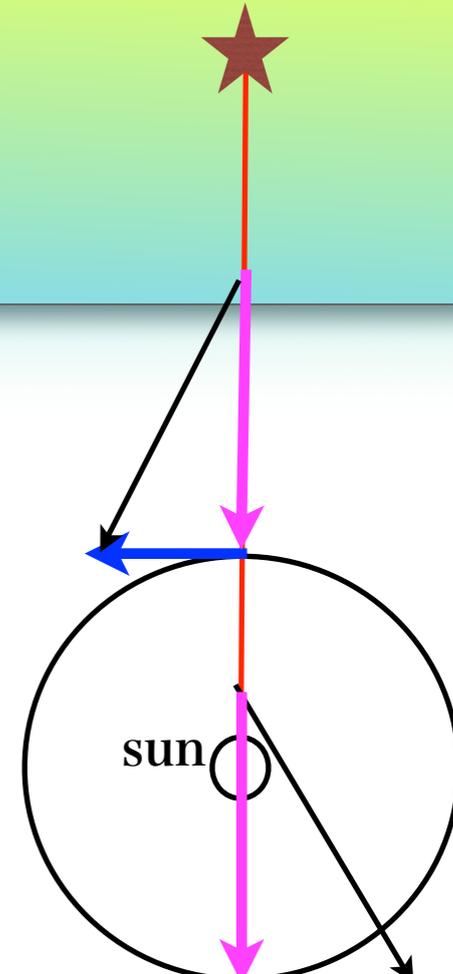
- マイケルソン・モーレー：ハー

$$c = 3.153 \times 10^8 \text{ m/s}$$

## フミラーと干渉

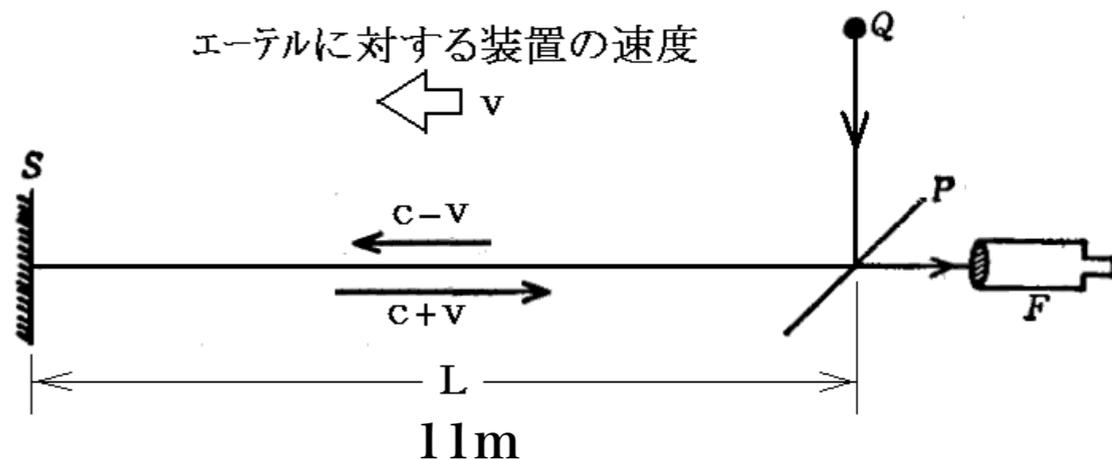
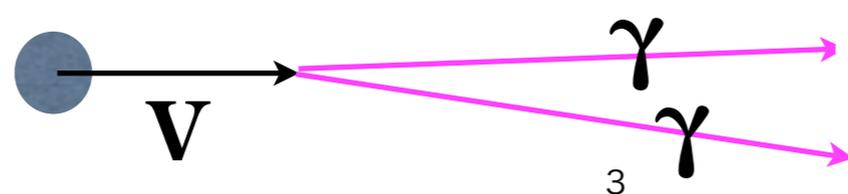
$$c = 2.99796 \times 10^8 \text{ m/s}$$

1862 地球の自転、公転によらず一定：  
走っていてもいなくても



- 高速粒子からの光

相対性理論  $\pi^0$



# 光の速さ

光速は**30万 km/秒**  $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$

- 地球の 私たちは500秒前の太陽を見ている



- もっと**遠く**の星は長い時間かかって地球に来た
- 遠い星の **過去**を見ている
- 光が1年かかって飛ぶ距離 1光年：1年前

9,460,730,472,581 km

兆

# 宇宙の大きさ

- 光が1年かかって飛ぶ距離=1光年

- 太陽と地球： $\frac{500\text{光秒}}{1,000,000 \times 16}$  光年

- とんりの太陽系：ケンタウルス座 $\alpha$  4.4光年

- 天の川銀河の大きさ：10万光年

- 銀河：アンドロメダ星雲

250万光年

- 最も遠い天体：133億光年



天の川銀河(想像図)

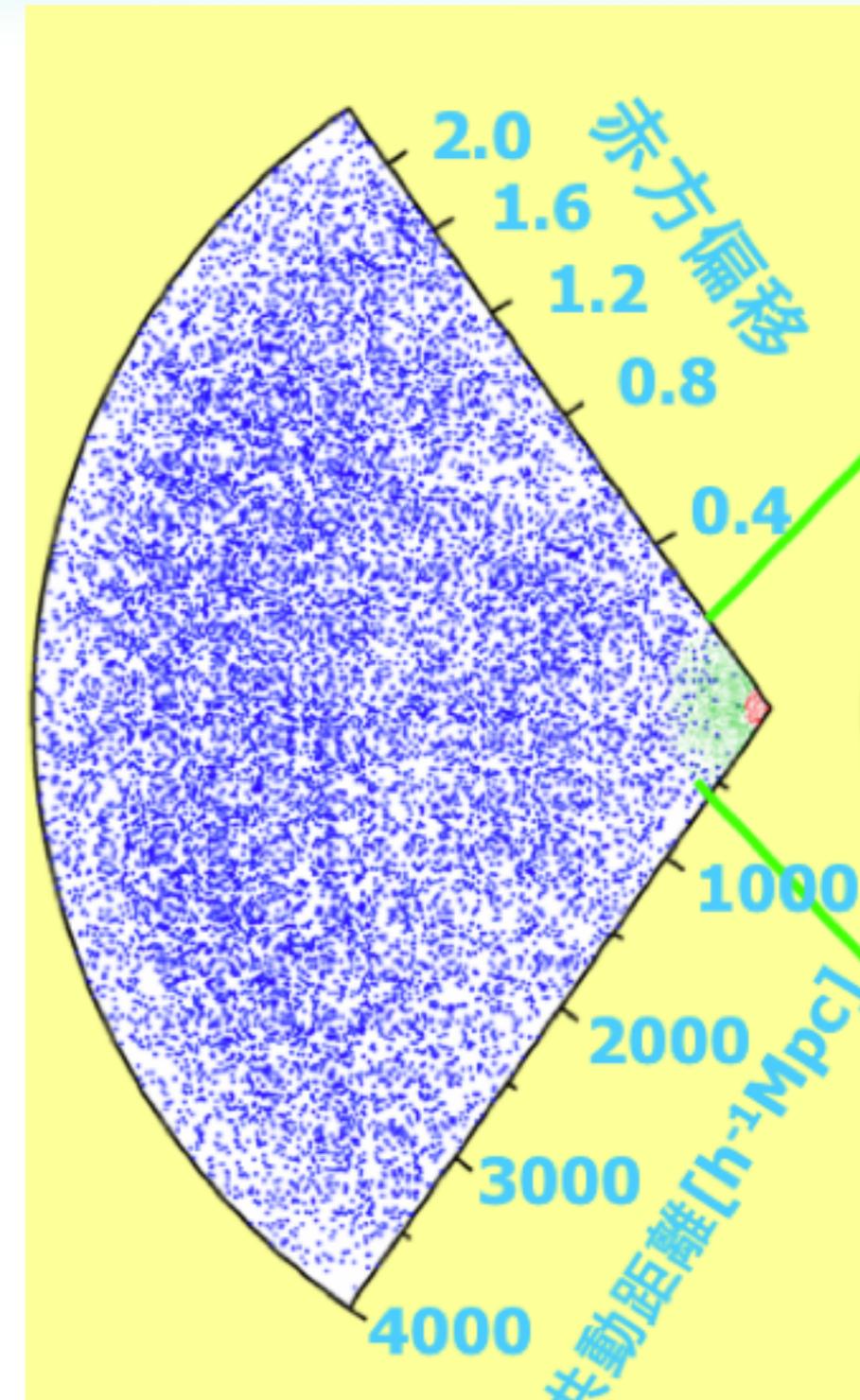
250万光年



# 宇宙の観測

遠い宇宙の星や銀河

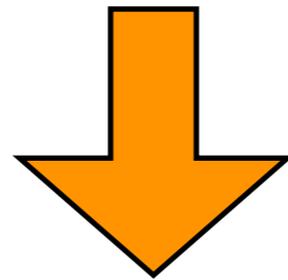
- 宇宙の観測
- 星、銀河などからの光
- 最も遠い光：133億年前
- 宇宙は133億歳以上年を取っている
- 宇宙は133億光年以上大きい



# 宇宙と夜空

1823年

- オルバーズのパラドクス
- 仮定1：宇宙には星や銀河が一様にある
- 仮定2：宇宙はどこまでも広がっている

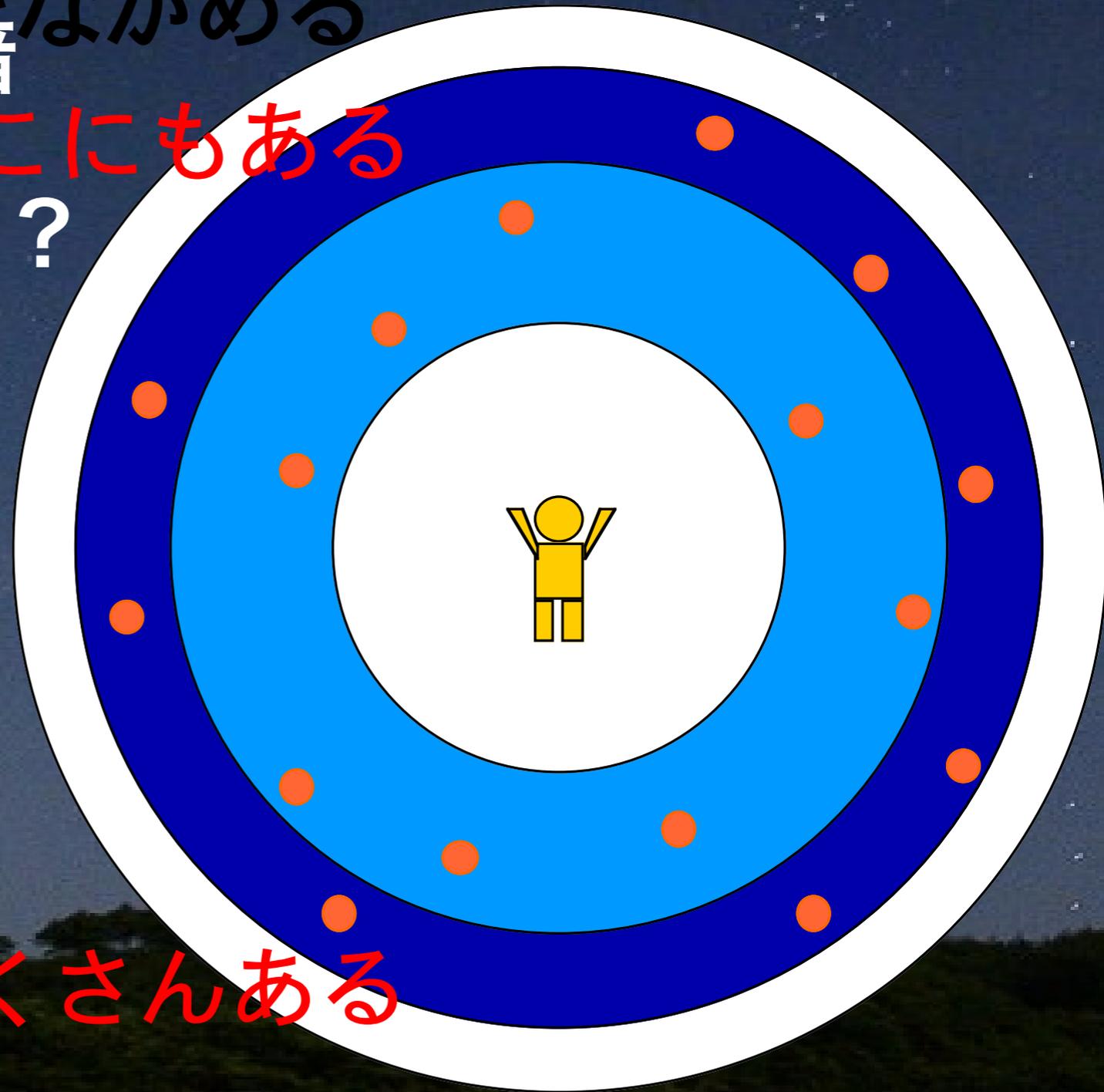


オルバーズ：

夜空は星や銀河で埋め尽くされ明るく輝く

# 夜空

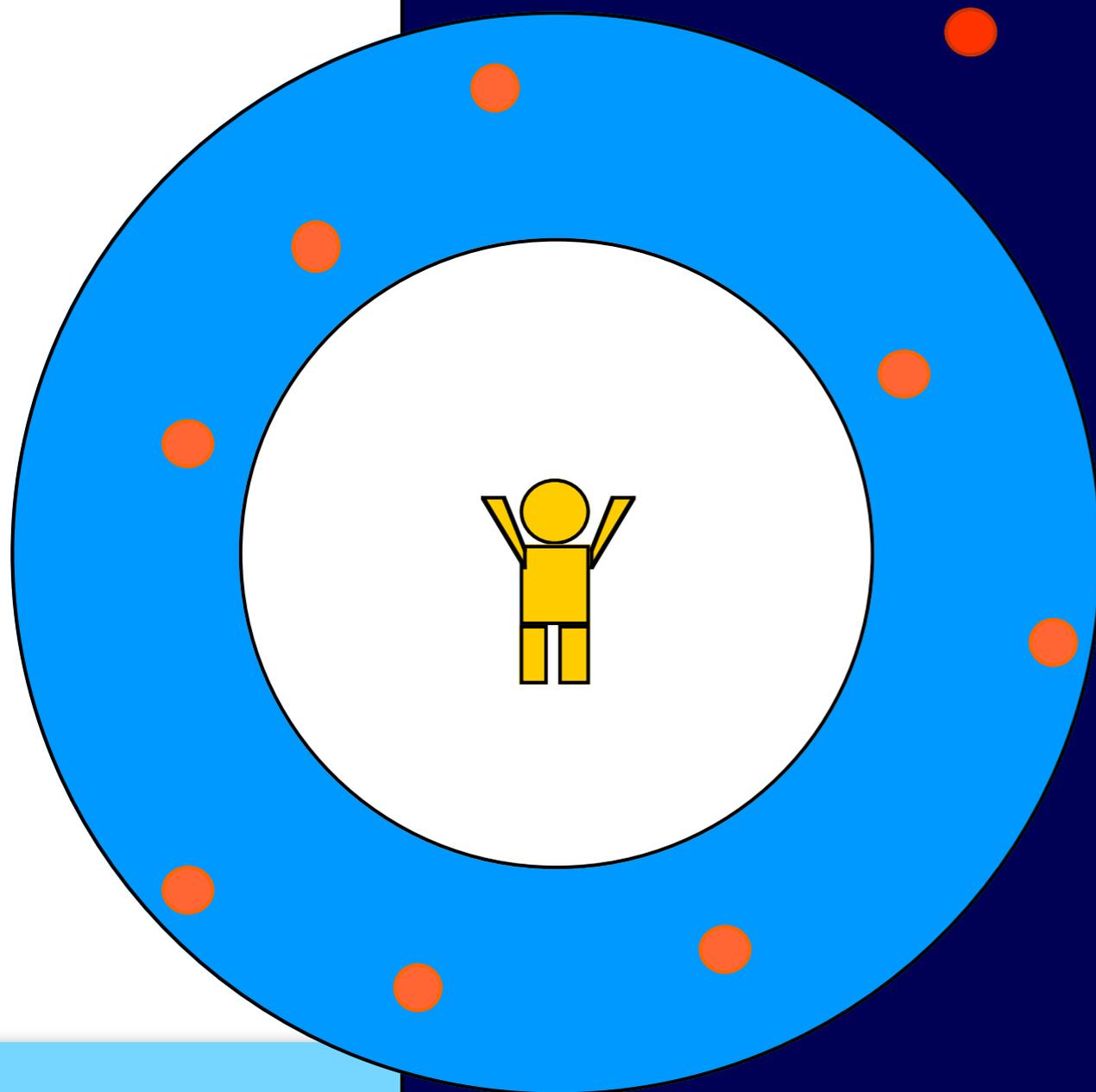
- 星と星の間は真っ暗  
夜空をながめる
- オルバーズは間違い？  
星がどこにもある



星がたくさんある

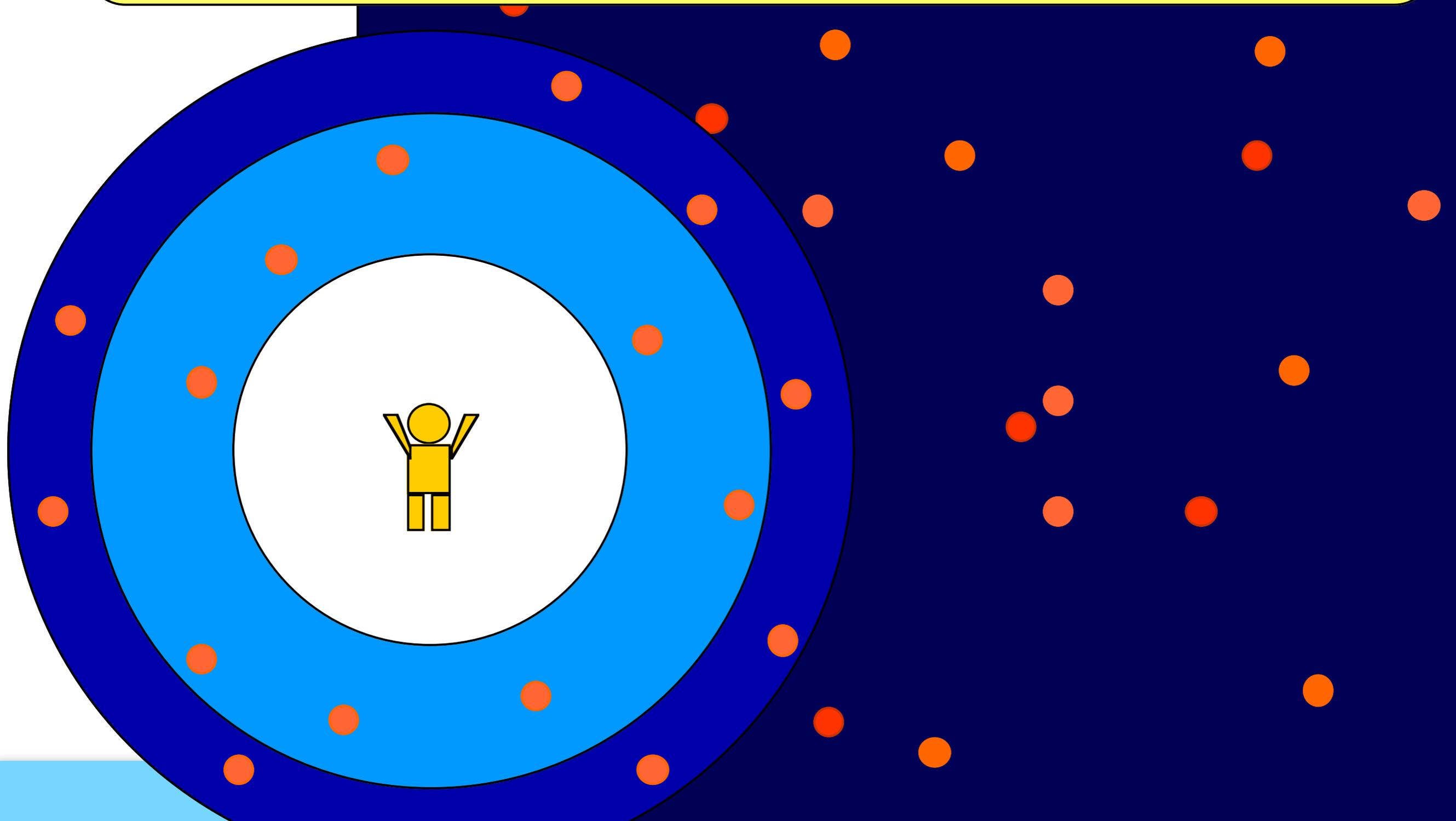
# 夜空をながめる

夜空をながめる：近くだけ見る



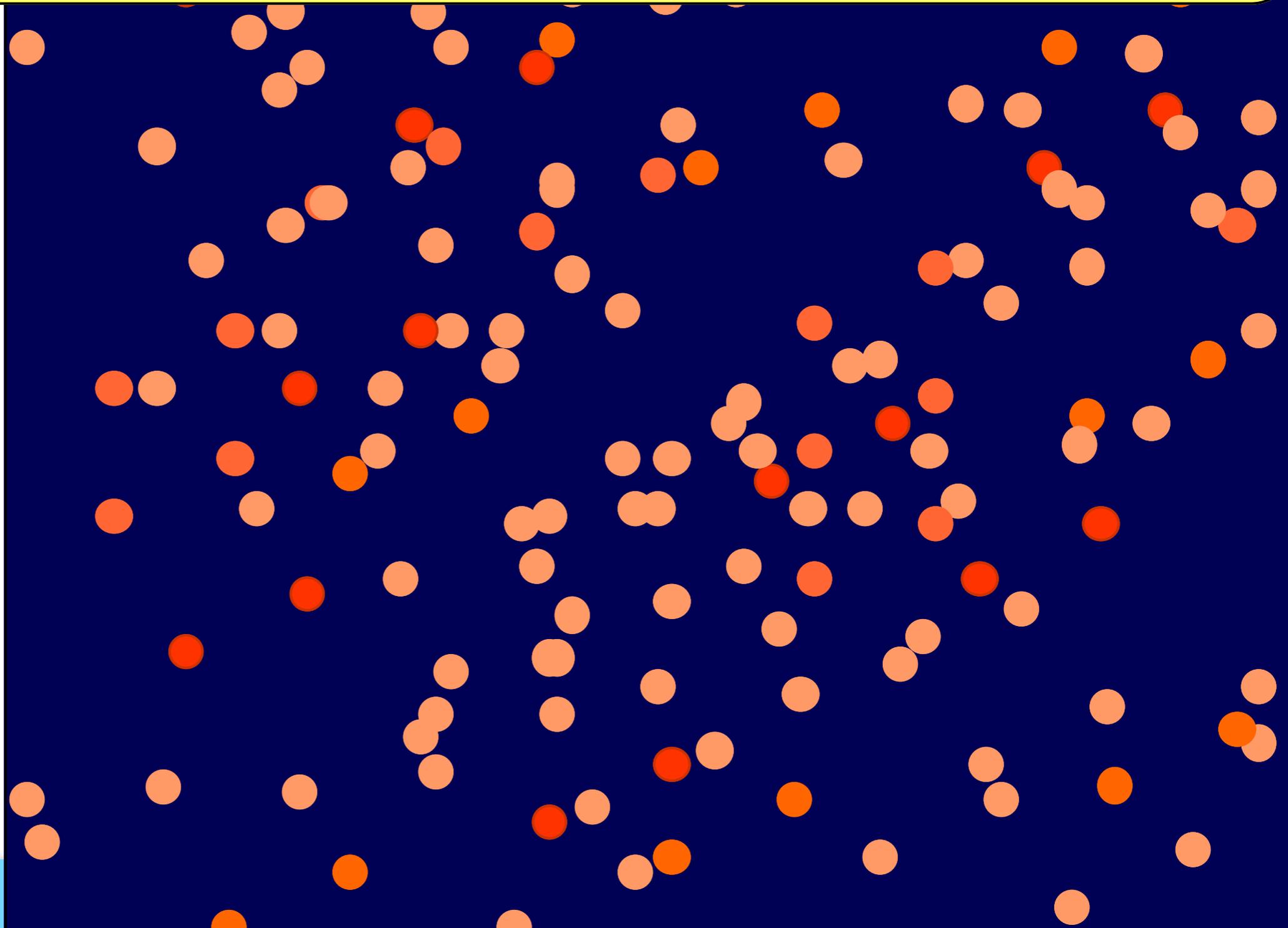
# 夜空をながめる

夜空をながめる：遠くも見る



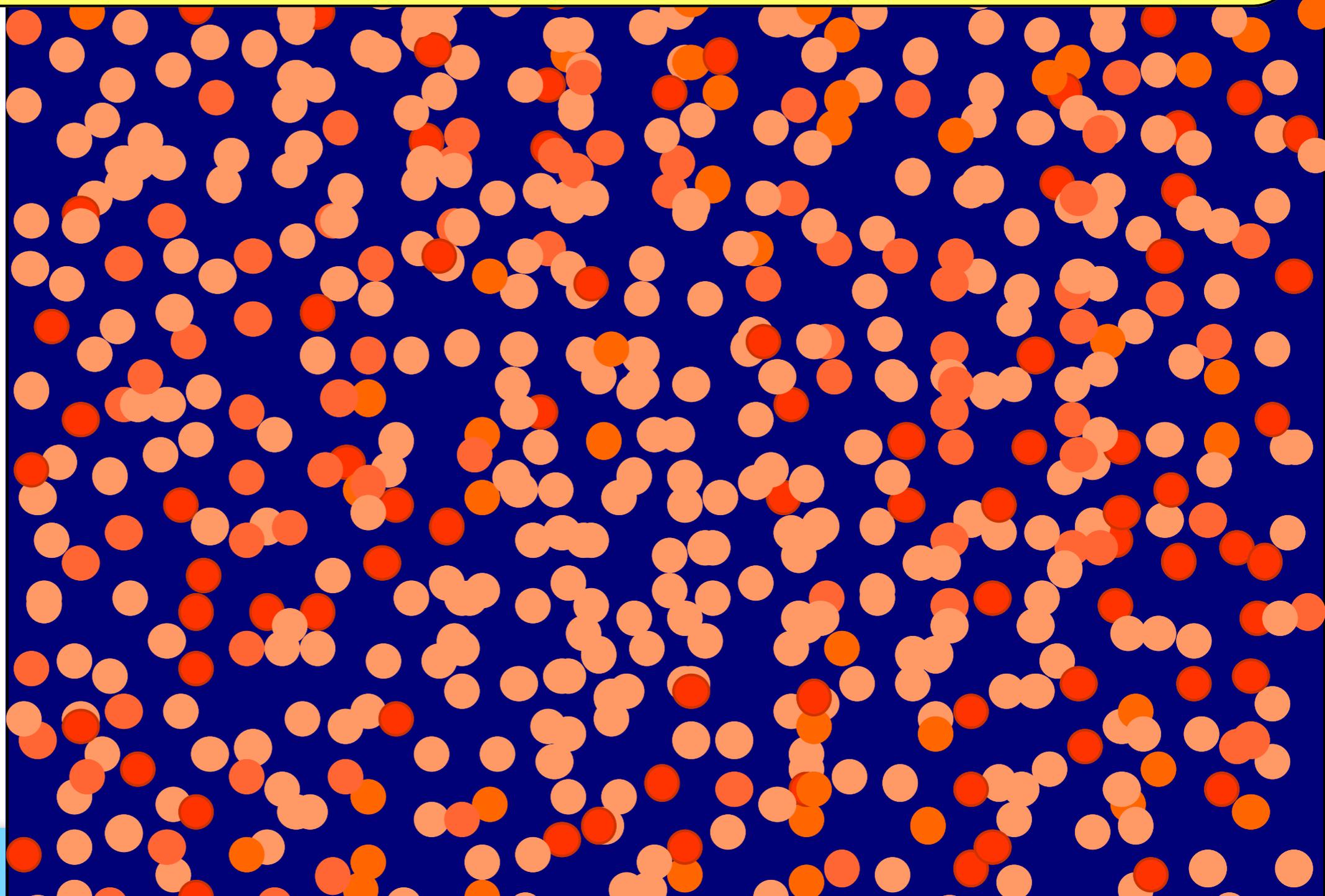
# 夜空をながめる

夜空をながめる：もっと遠く



# 夜空をながめる

夜空をながめる：もっと<sup>2</sup>遠く



# 夜空をながめる

夜空をながめる：もっと $\infty$ 遠く

夜空は星  
でうめつ  
くされる

夜空は光輝いているはずだ！

# オルバーズのパラドクス

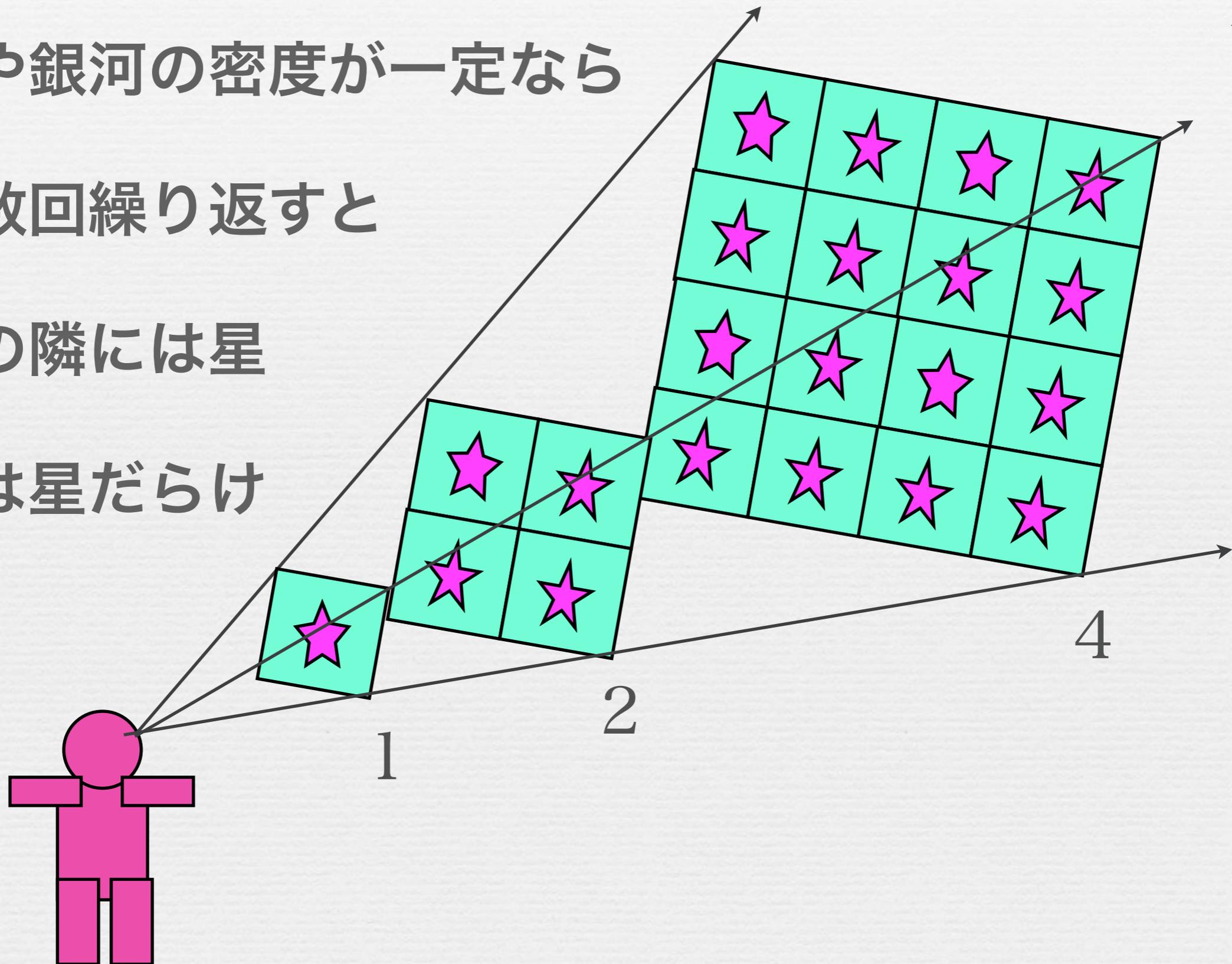
1823年

星や銀河の密度が一定なら

多数回繰り返すと

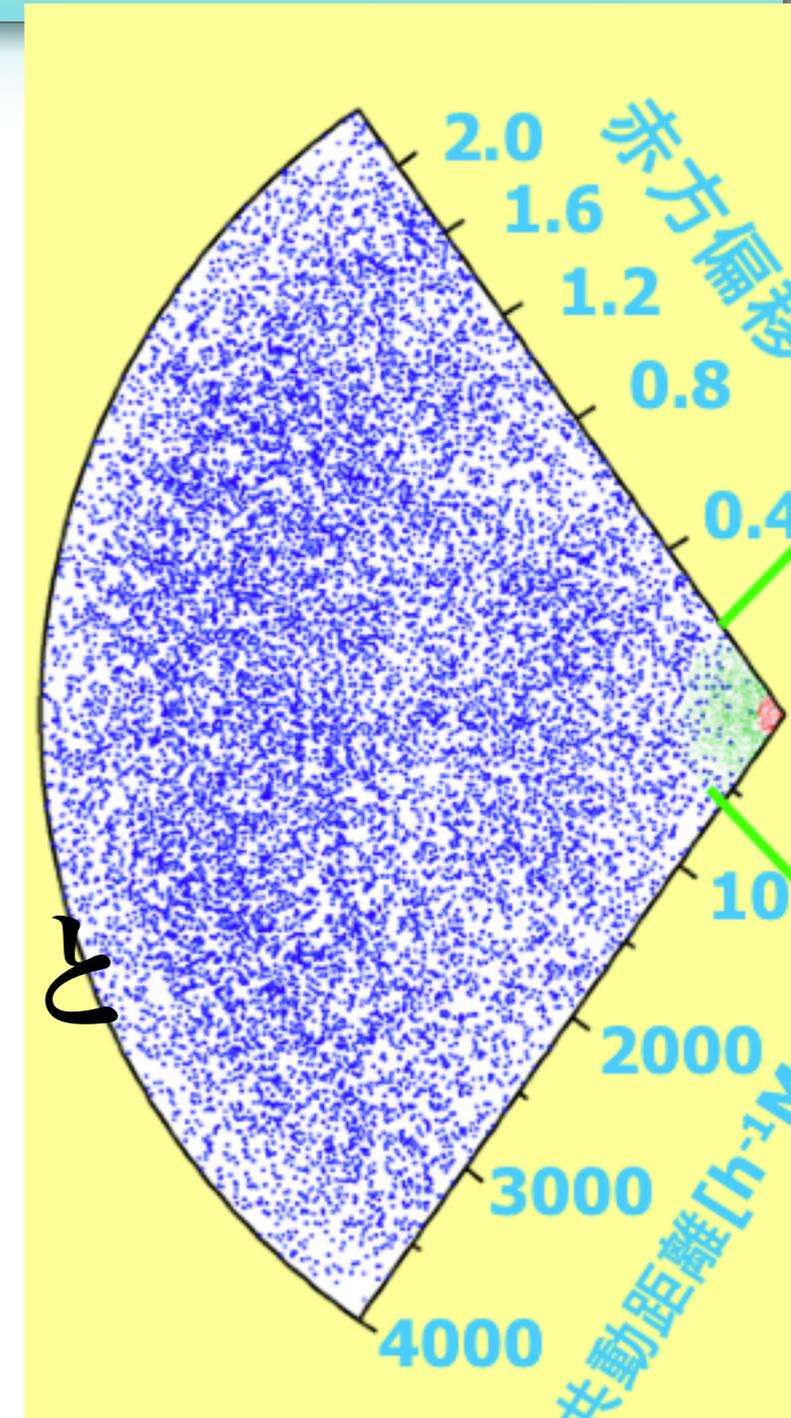
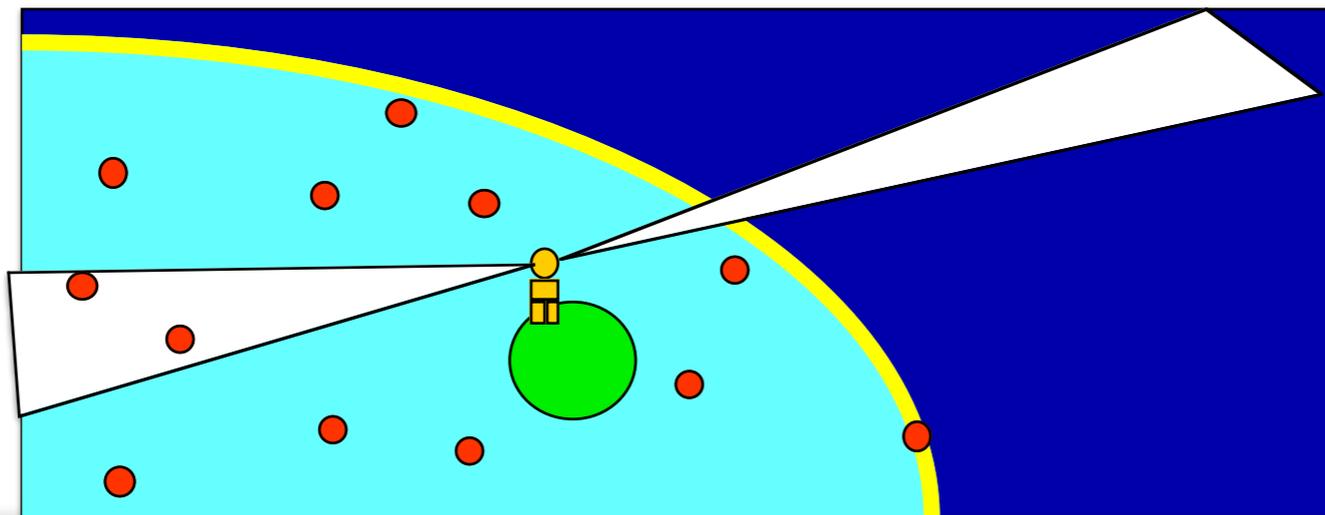
星の隣には星

空は星だらけ



# オルバーズはまちがいか

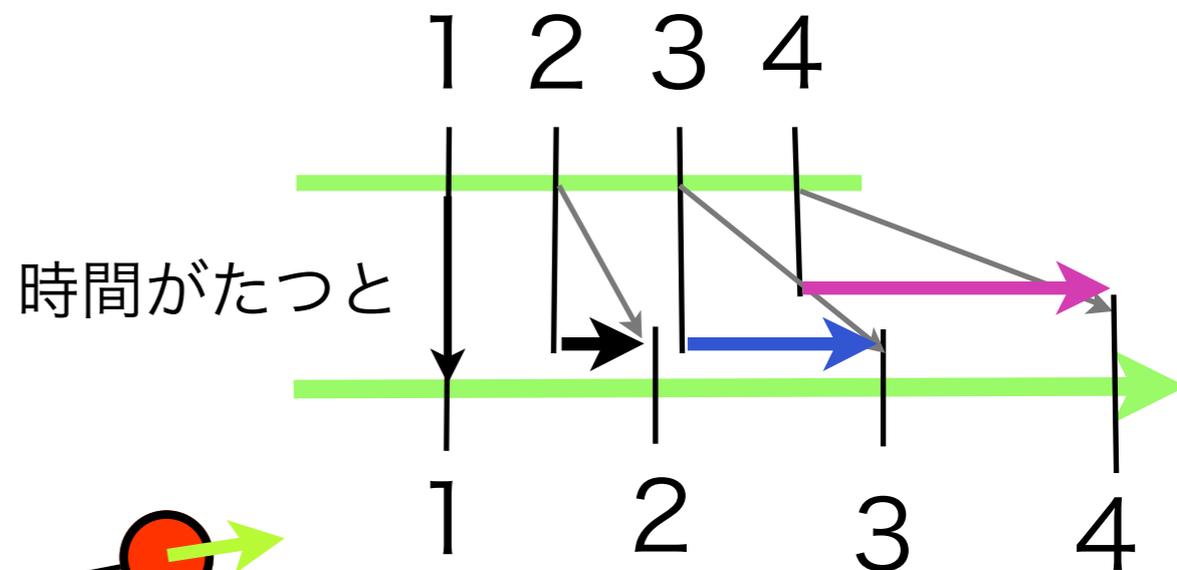
- 仮定1：宇宙で星や銀河が
- **一様**にある
- **今でも観測事実**
- 仮定2：宇宙は**どこまでも広がって**いる 宇宙の大きさに限りがあると



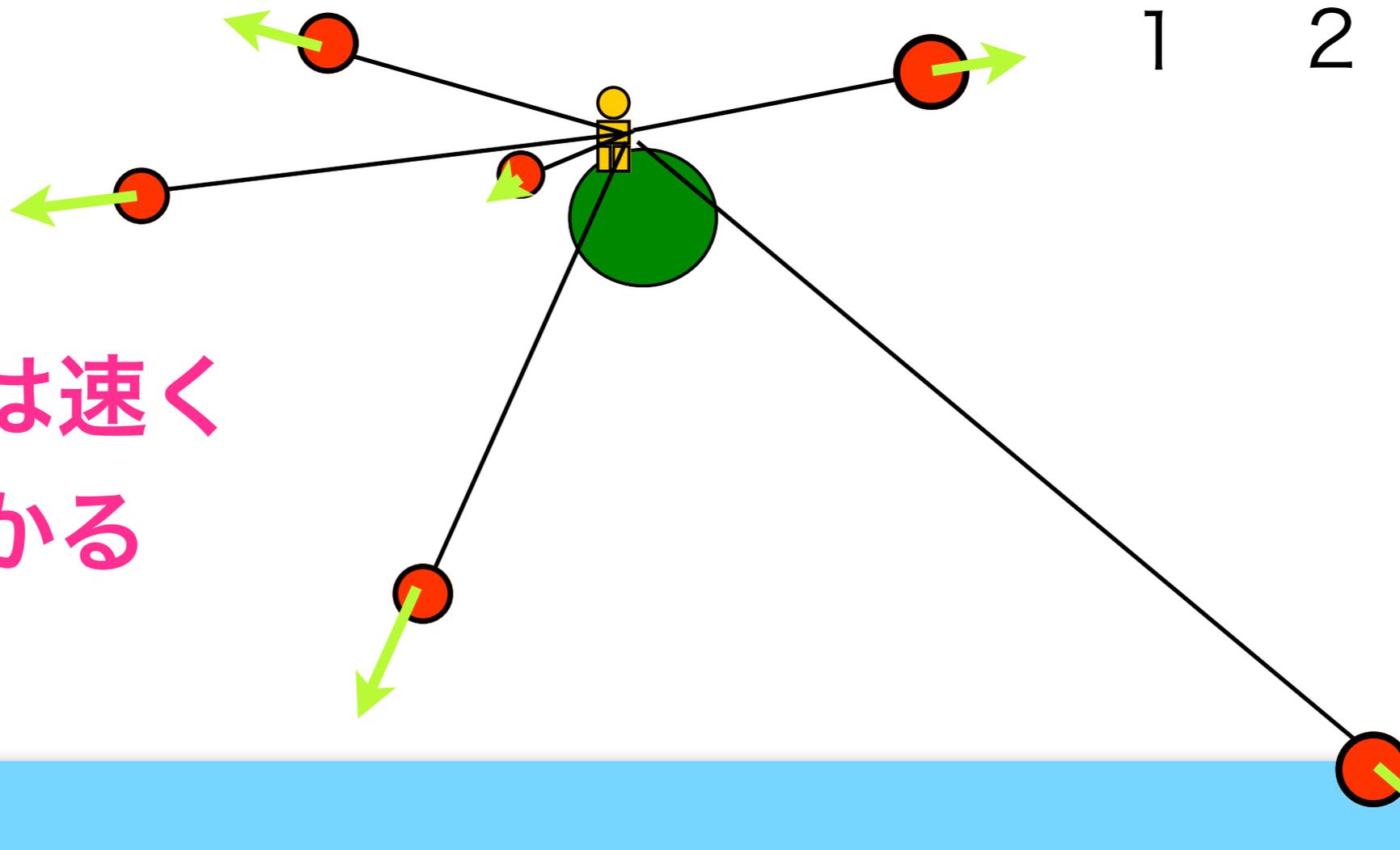
# ハッブル膨張

- 宇宙は膨張している (ハッブル)
- 宇宙は永遠に定常ではない
- 遠い星ほど速く遠ざかる

ゴムひもモデル



遠い星は速く  
遠ざかる



# オルバーズを解決

- 宇宙は膨張は遠いほど速い：ハッブル

- 遠くでは**光速**を超えて見えなくなる

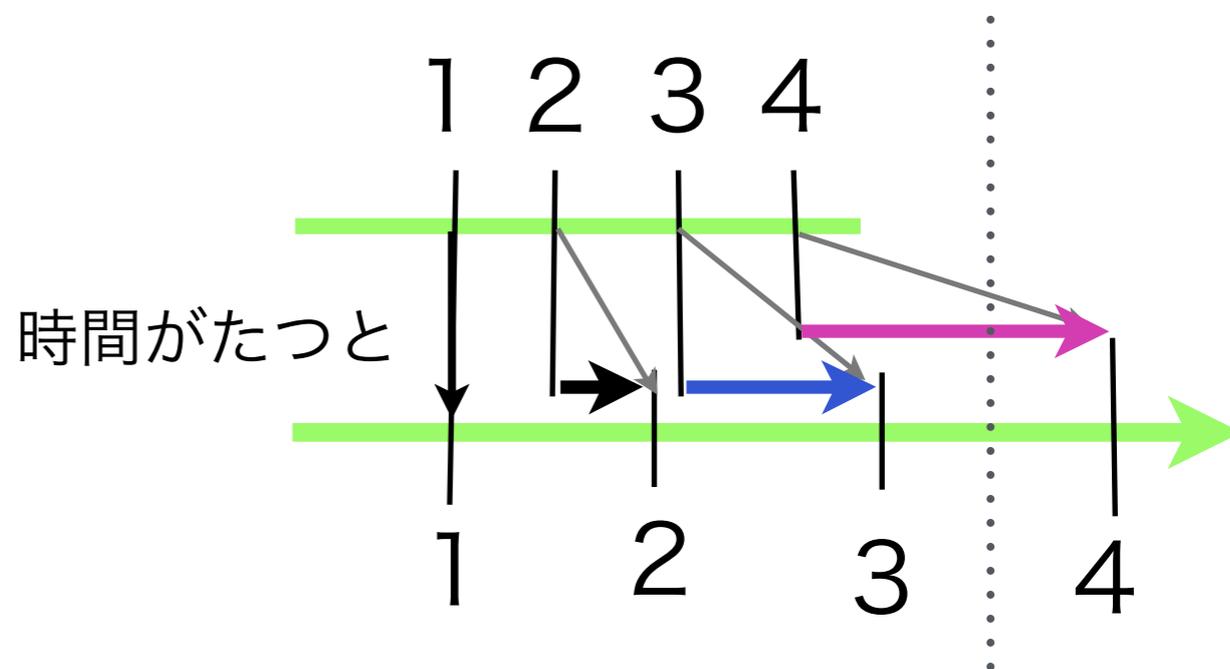
その先の宇宙はある

- 宇宙の地平線：138億光年

見える限界  
宇宙の地平線

- その先の宇宙はある

- 昨日は見えていた



# 宇宙は膨張し続けるか？

- 3つの可能性

- 三角形の角度の和

- 180度より

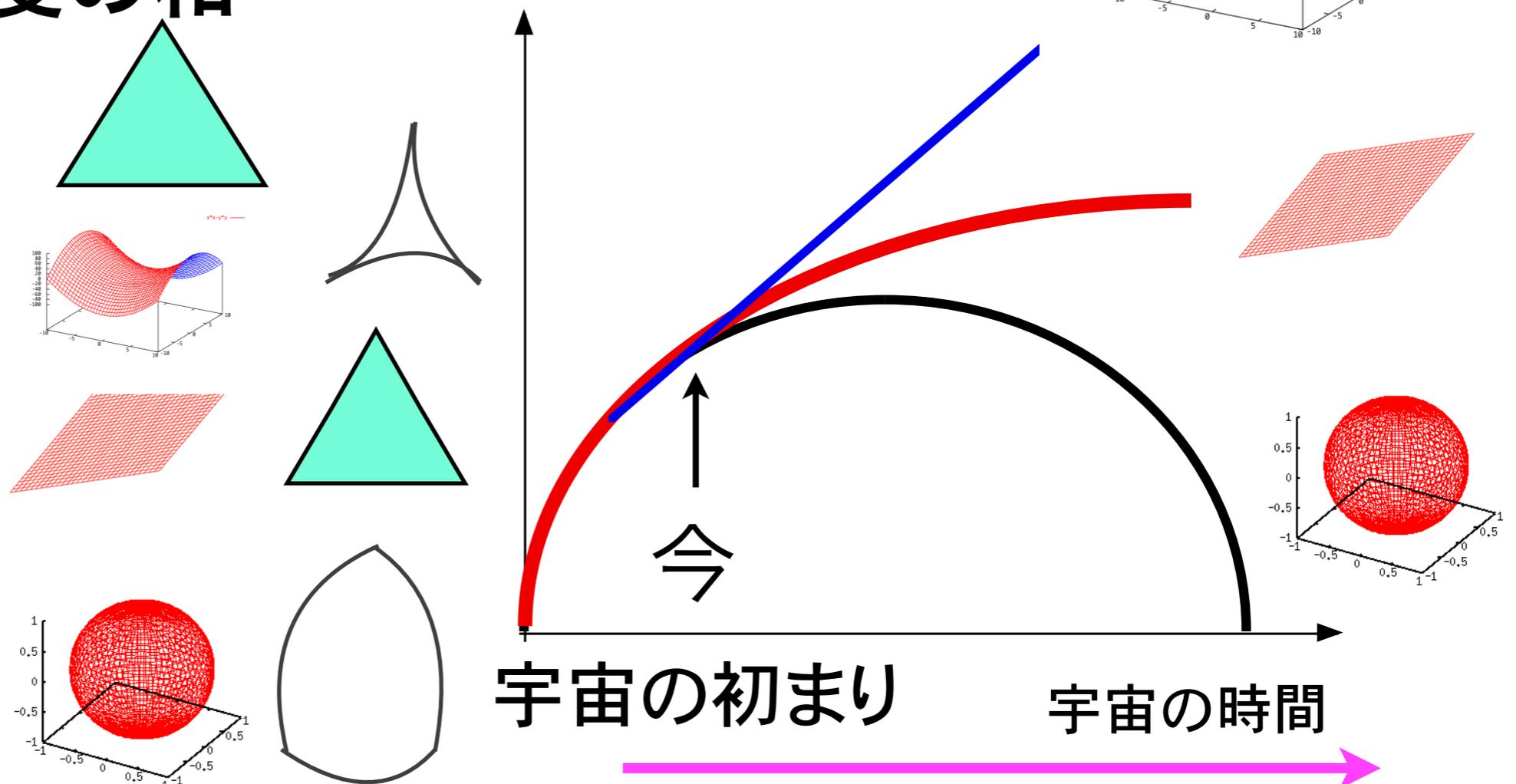
- 小さい

- 等しい

- 大きい

## 宇宙膨張

宇宙の大きさ

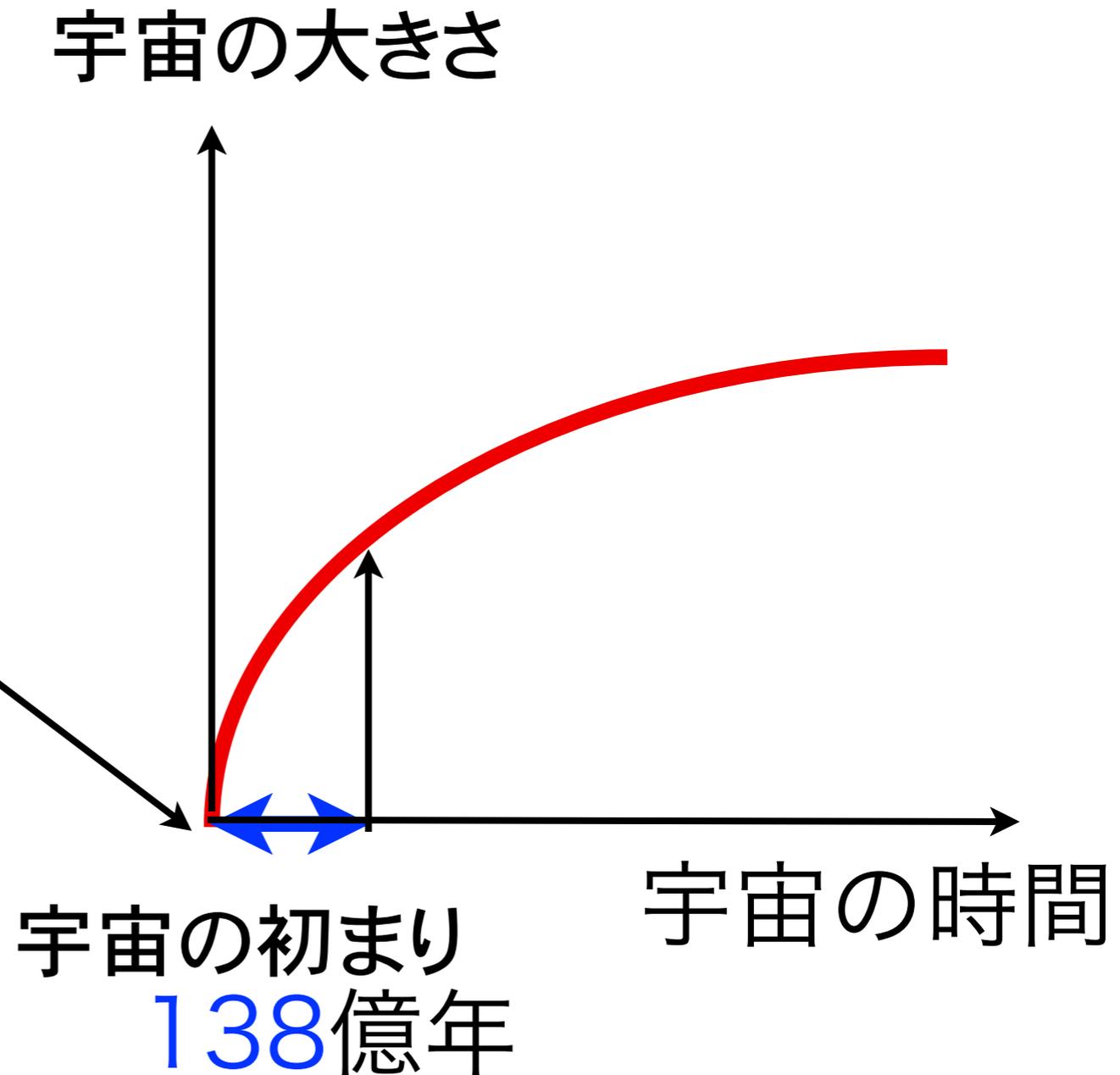


観測結果は**永遠に膨張**をつづける

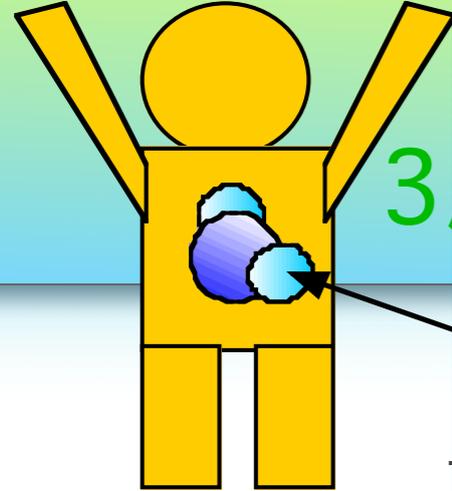
温度下がる

# 宇宙の初まり

- 宇宙膨張の時間の針を逆まわし 宇宙膨張
- 宇宙の初まり
- ビッグバン
- 138億年前
- 初まりは小さかった
- 高温だった



# 宇宙の歴史



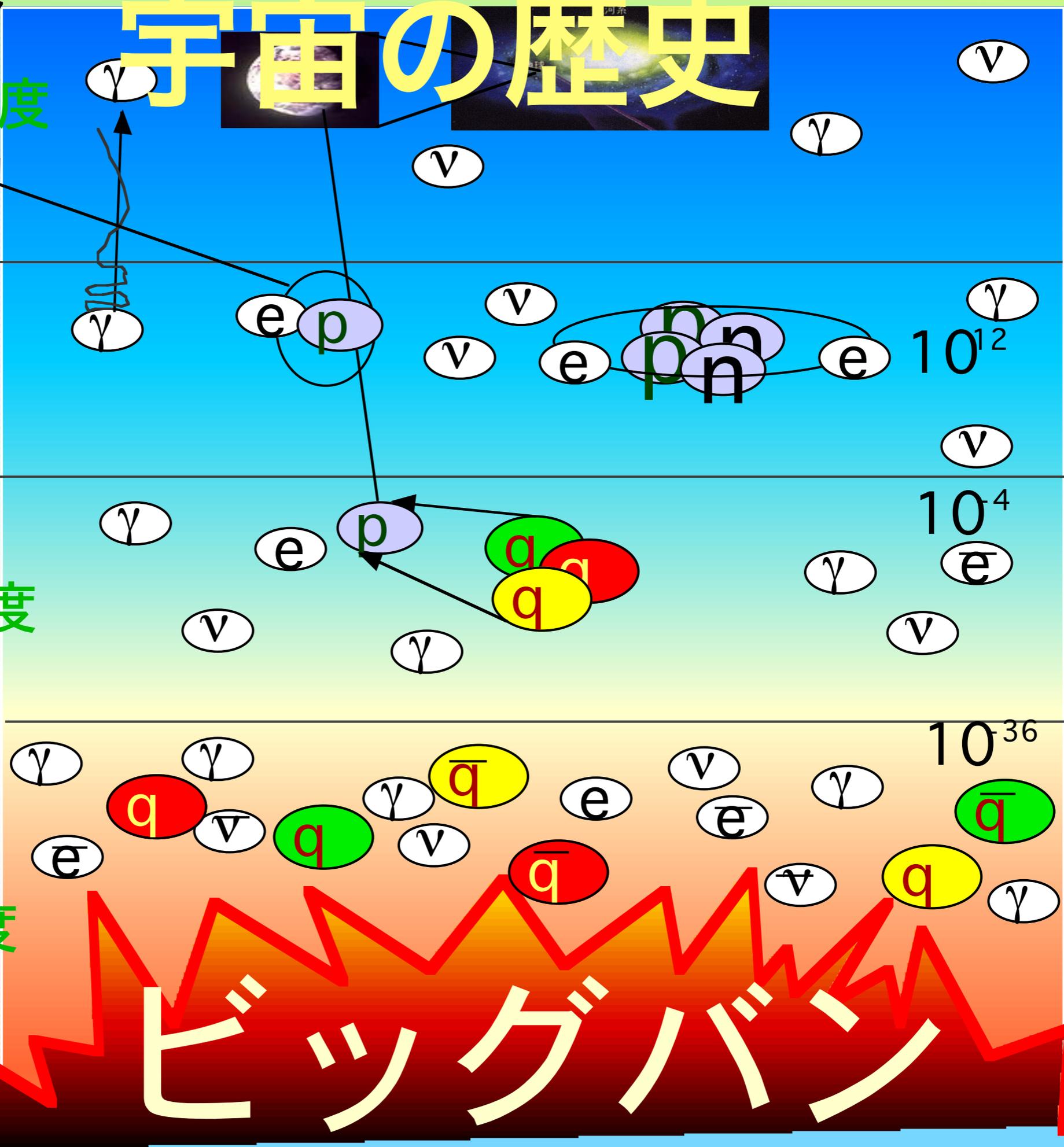
3度

↑ 温度冷える

$10^4$ 度

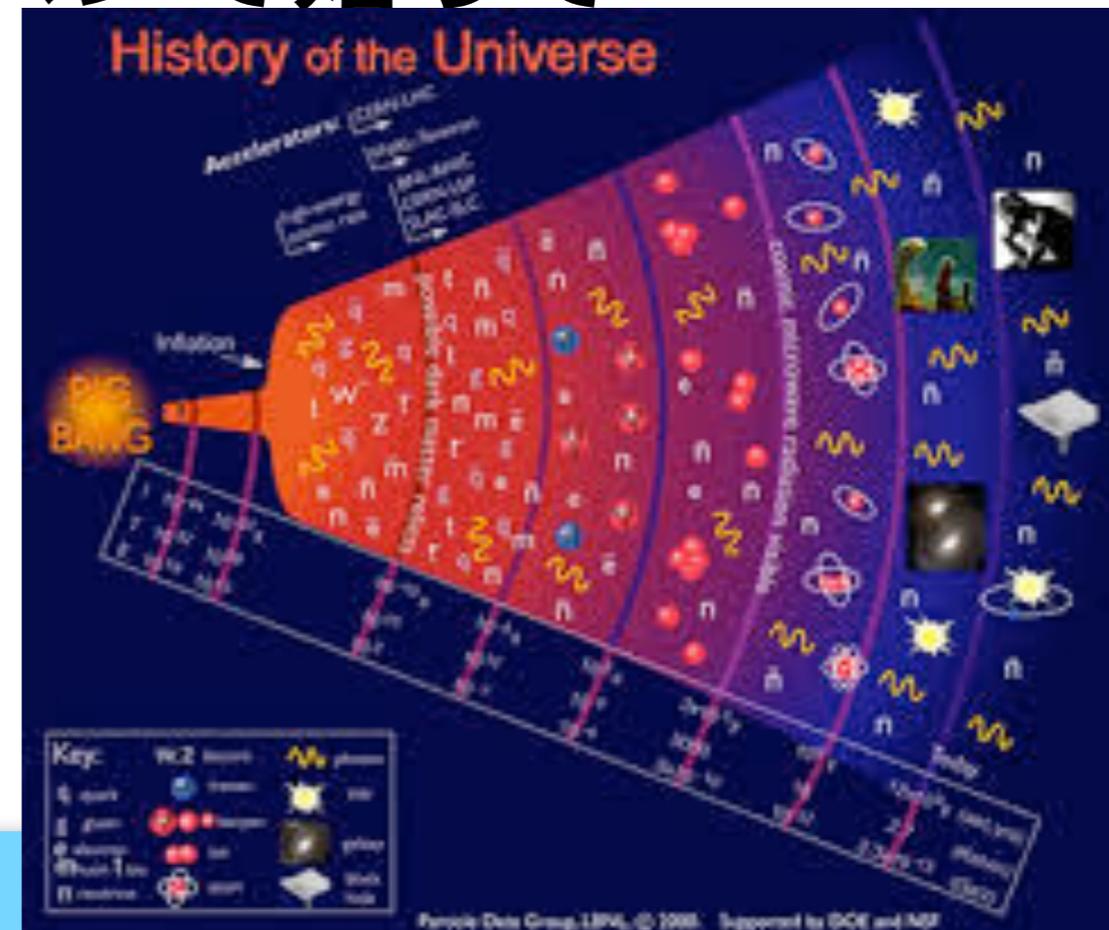
$10^{13}$ 度

$10^{29}$ 度



# 光と宇宙のまとめ

- 光速は30万km/秒
- この物差しで測って
- 宇宙の端まで138億光年
- 宇宙は138億年前のビッグバンで始って
- ぼうちやうをつづけている



# 速さ

速さ = (距離) ÷ (時間)

よーいドン

ゴール



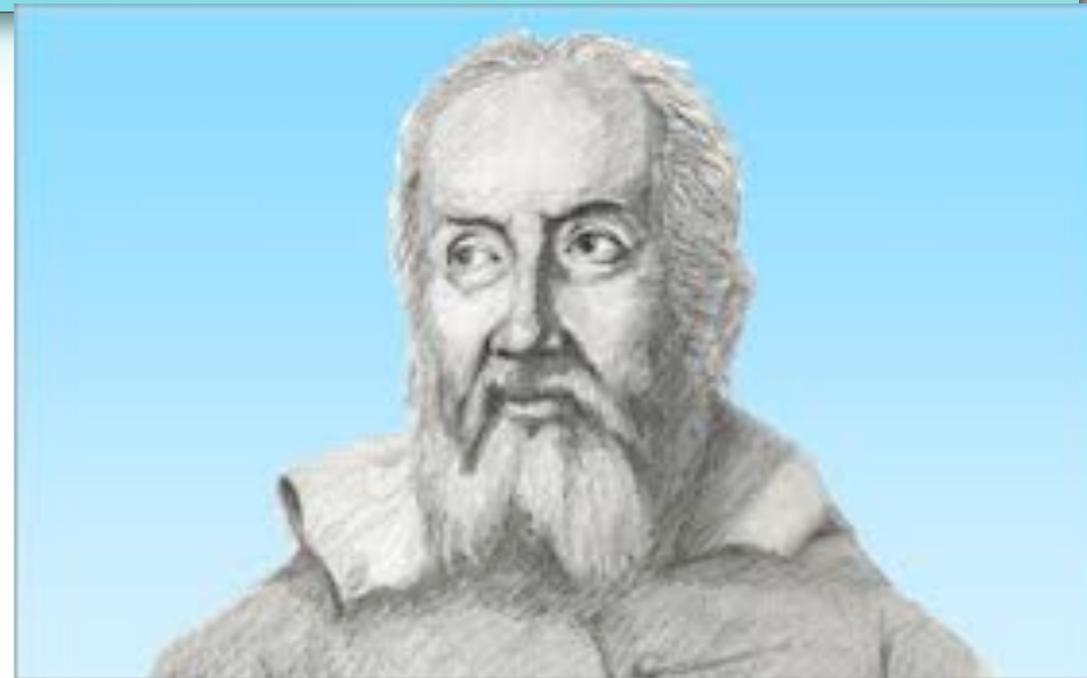
時間



距離

# 光の速さ

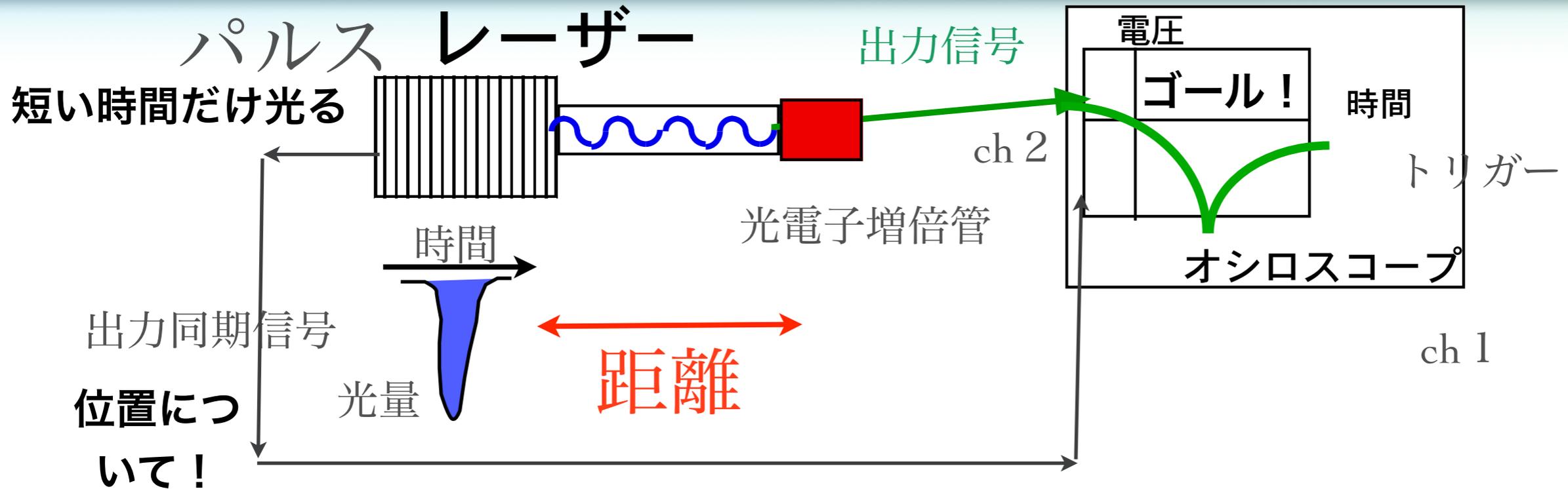
- 光速 300000km/秒
- 300000m/ミリ秒
- 300m/マイクロ秒
- 0.3m/ナノ秒 : 1ナノ秒で30cm



## ガリレオの実験



# 光速を測る



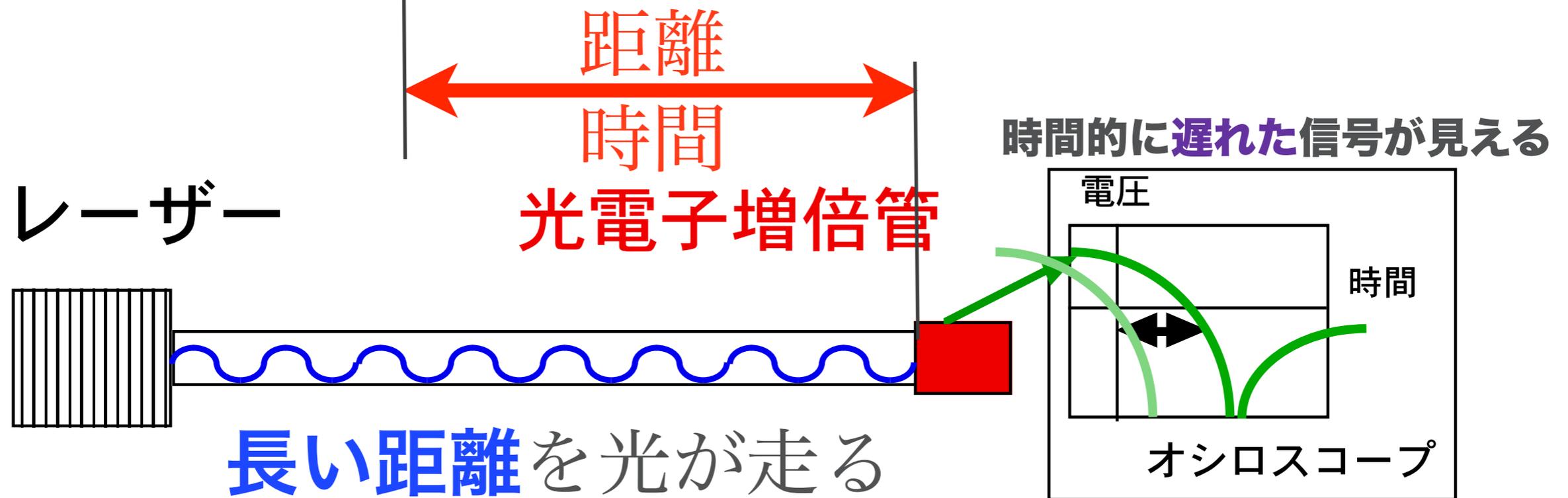
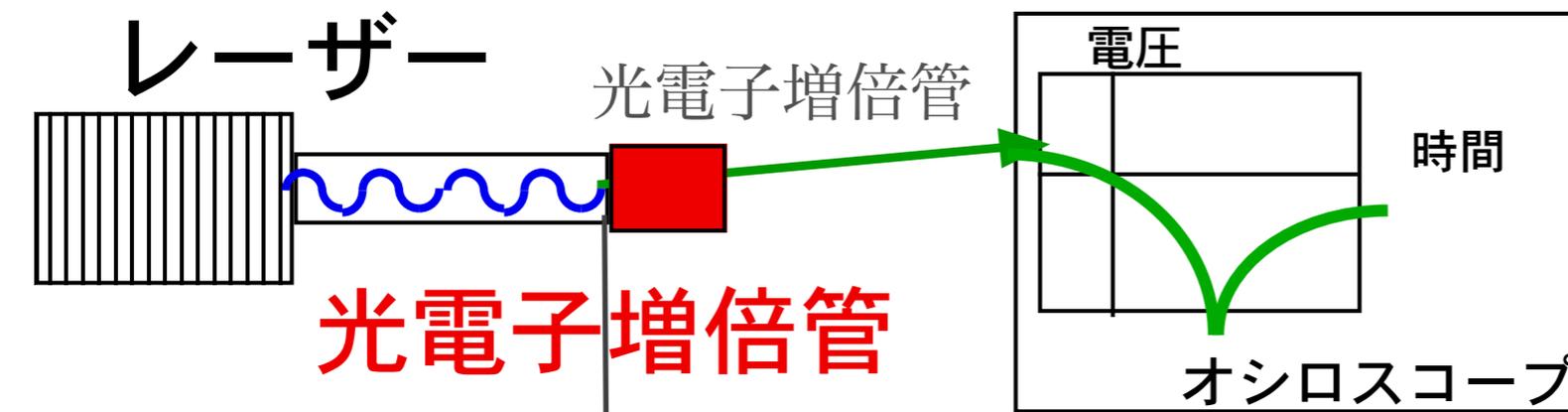
# 装置

- オシロスコープ：時間を測る
- 横は時間で**ナノ秒**を測れる
  - 縦軸：信号の大きさ
- パルス**レーザー**装置
  - 短いパルス(ピコ秒) 光る
- **光電子増倍管**
  - レーザーパルスを捉える



# 光速測定実験

$$\text{光速} = \frac{\text{距離}}{\text{時間}}$$



長い距離を光が走る

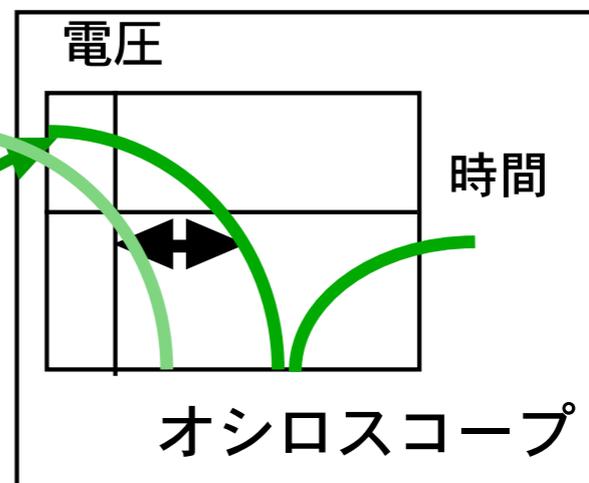
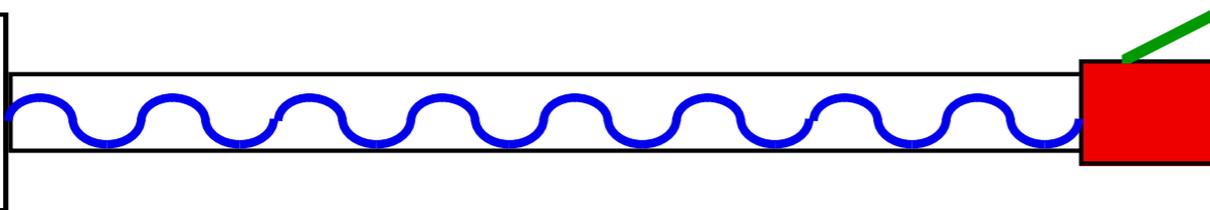
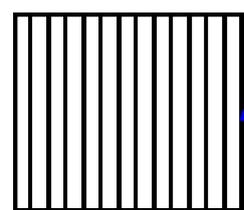
右ほど遅い

# 光速は遅くなる

- 空気中より物質中で遅い

レーザー

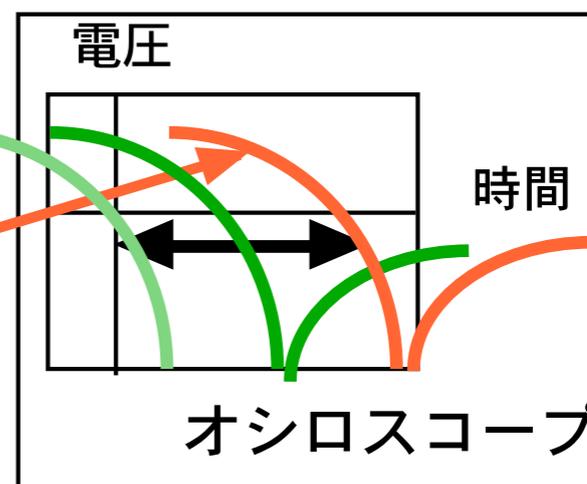
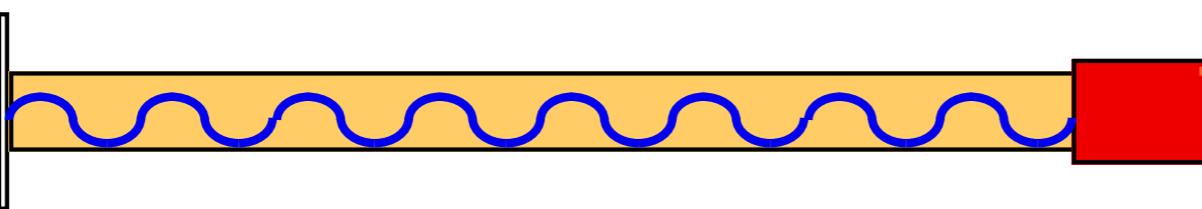
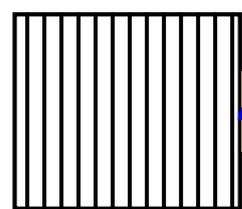
光電子増倍管



アクリル棒を入れると更に遅れる

レーザー

光電子増倍管



$$\text{屈折率} = \frac{\text{光速 (空中)}}{\text{光速 (物質中)}} > 1.0$$

右ほど遅い

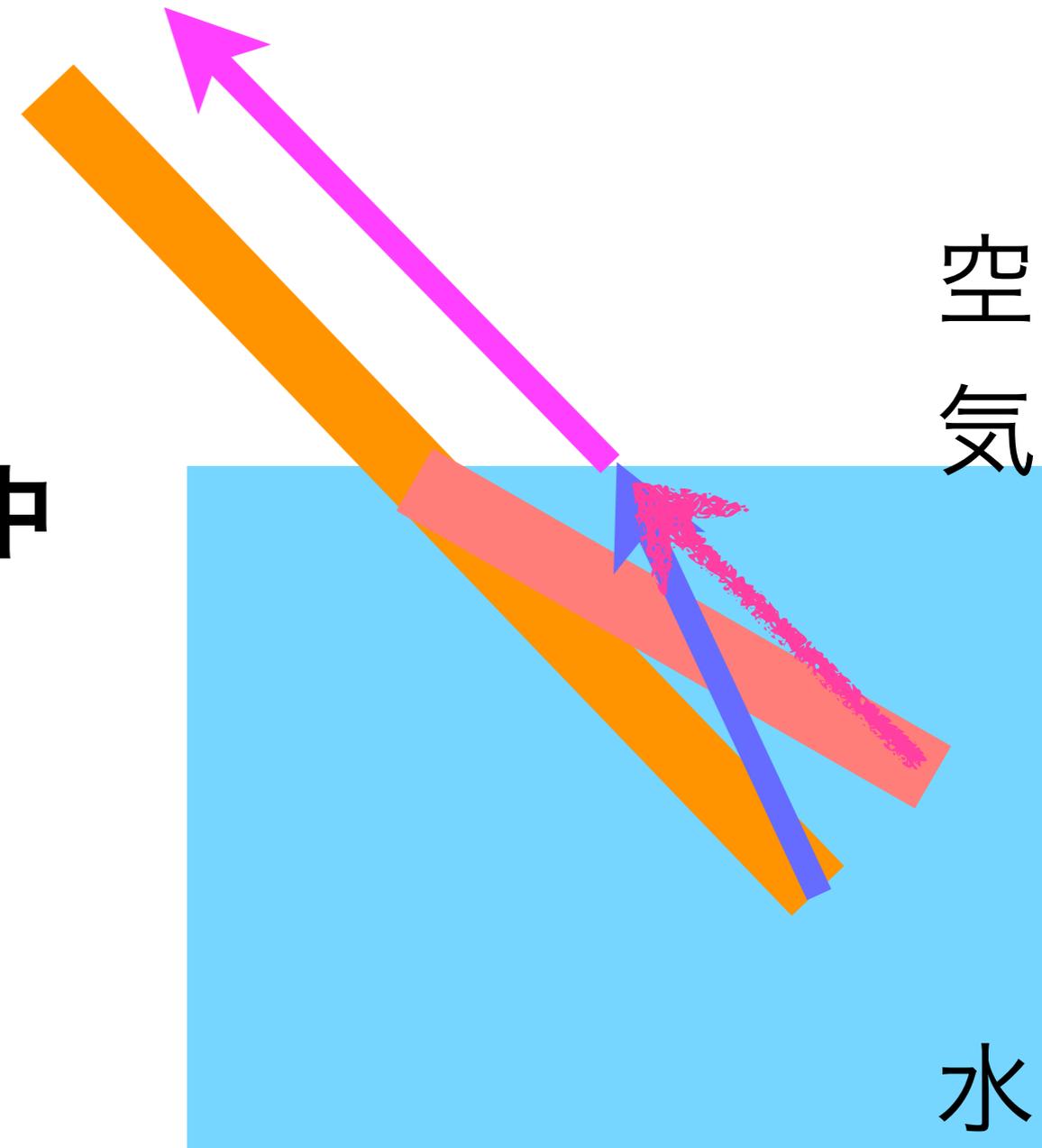
# 光と光速

- 光は速い 30万km/秒
- 光速は物質中ではおそくなる 水中では遅い
- コップの中の箸は曲がって見える



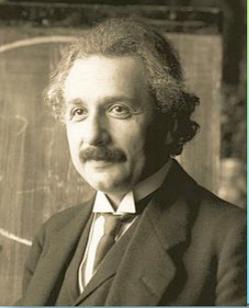
# 光も曲がる

- 光は直進する：なにもないところでは
- 境界面で曲がる：屈折
- 光の速さが異なる
- 光速=30万km/秒：真空中
- 光速=23万km/秒：水中
- 箸が曲がって見える

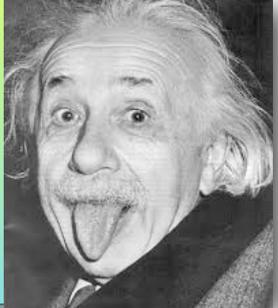


# まとめ

- 光速は30万km/秒
- 宇宙の物差し
- 宇宙の端まで138億光年
- 物質のなかでは遅い

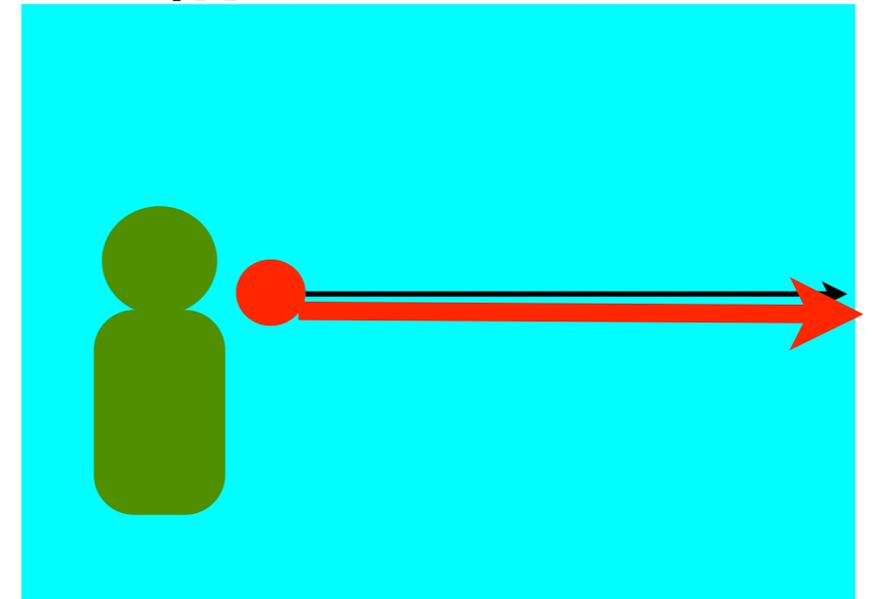


# 光は曲がる



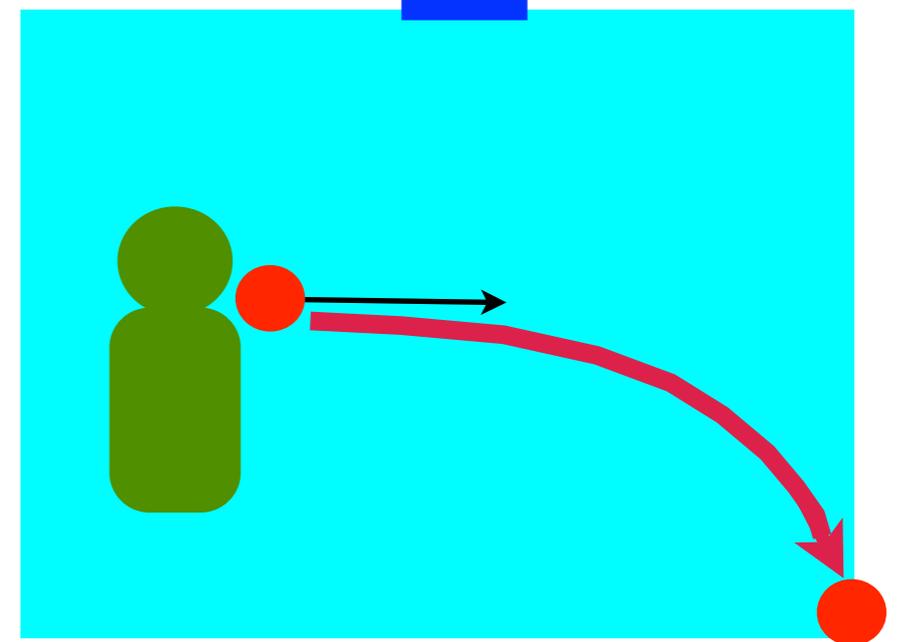
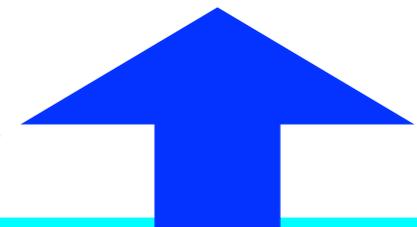
- 静止ロケット内では光は直進  
(なんでも)

静止ロケット



- 加速するロケット
- 投げたボールは放物線を描く
- あたかも重力があるのと同じ
- このボールを**光**に変えても
- 同じことが起きる

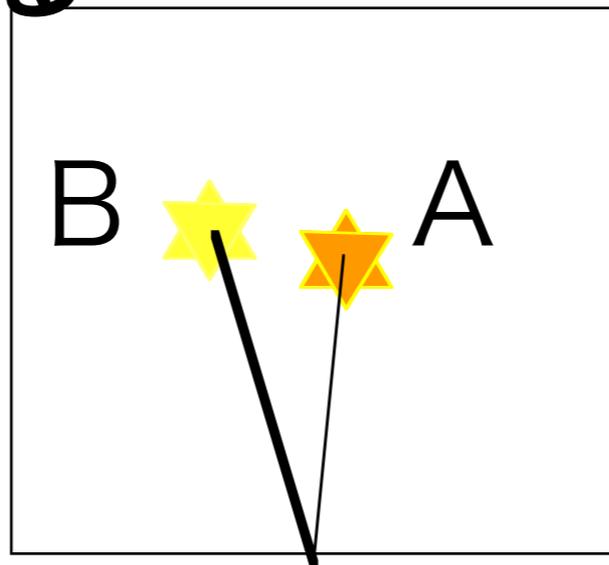
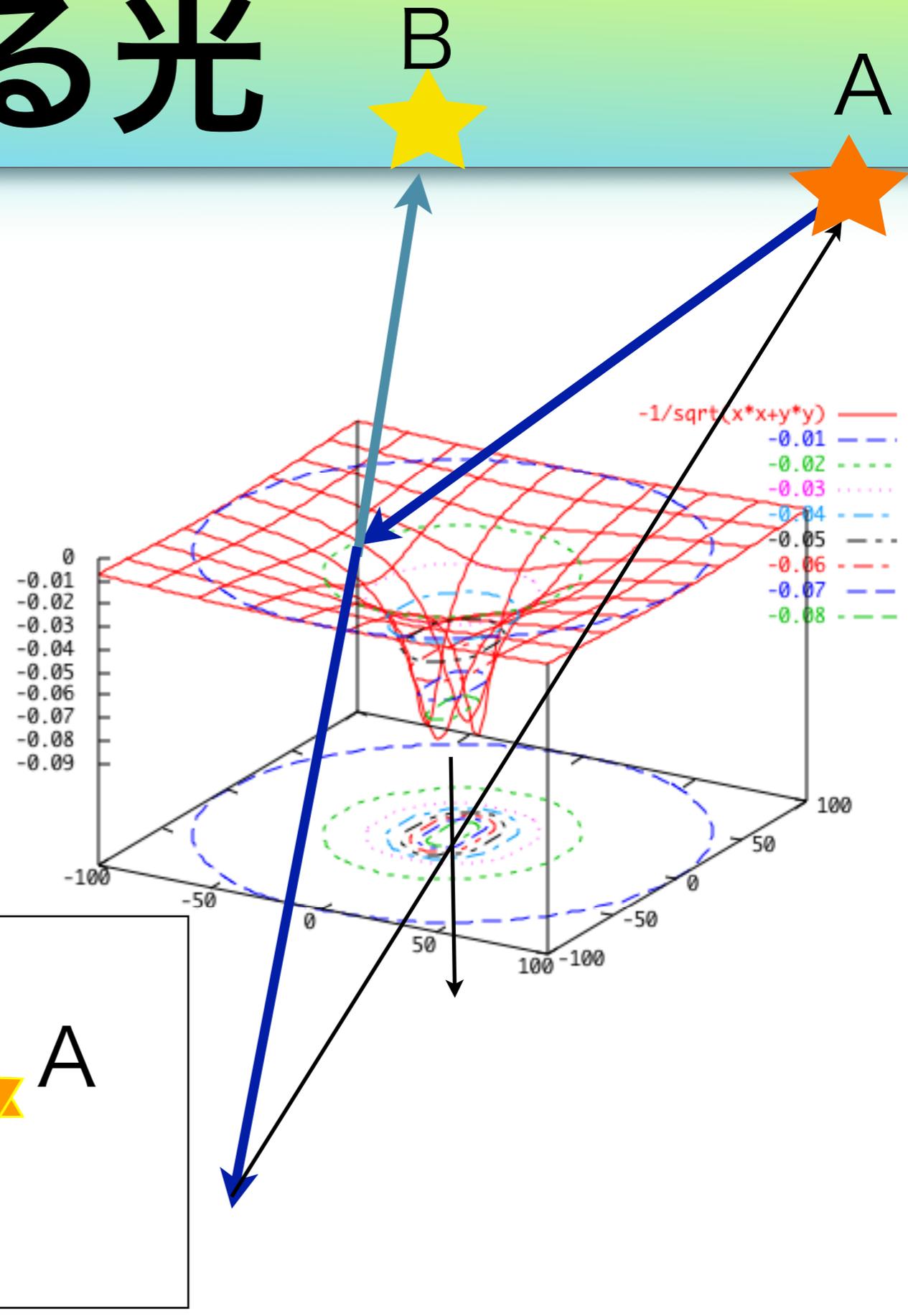
加速



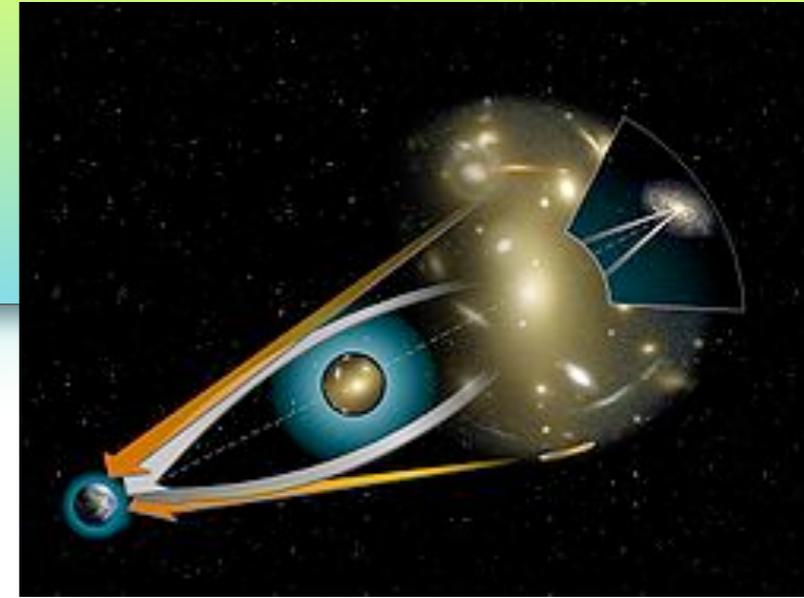
光が曲がる

# 曲がる光

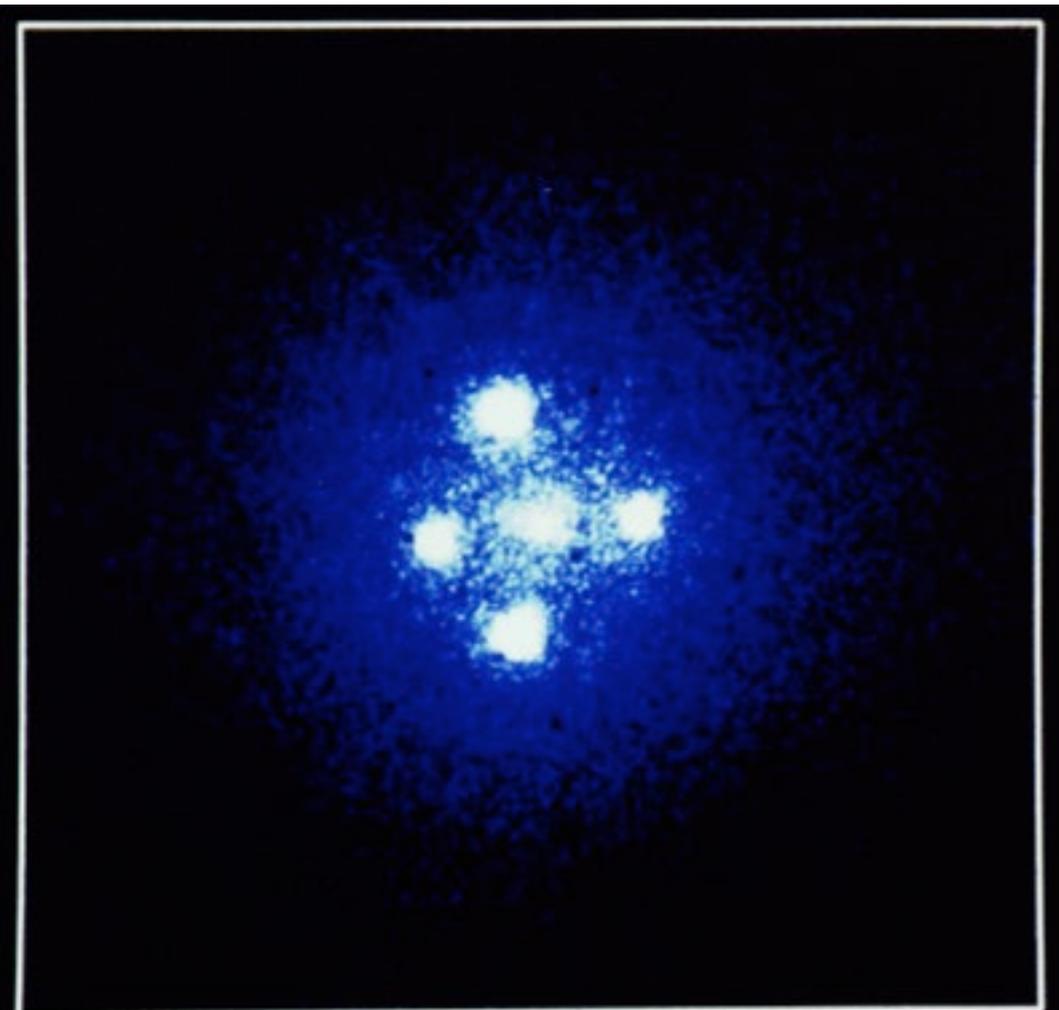
- 大きな質量＝強い加速度
- ある星Aの前に質量の大きな銀河（星）があると
- 別の像Bが見える
- 質量は空間を曲げる



# 重力レンズ



- ハッブル望遠鏡



Gravitational Lens G2237+0305



Galaxy Cluster Abell 2218

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