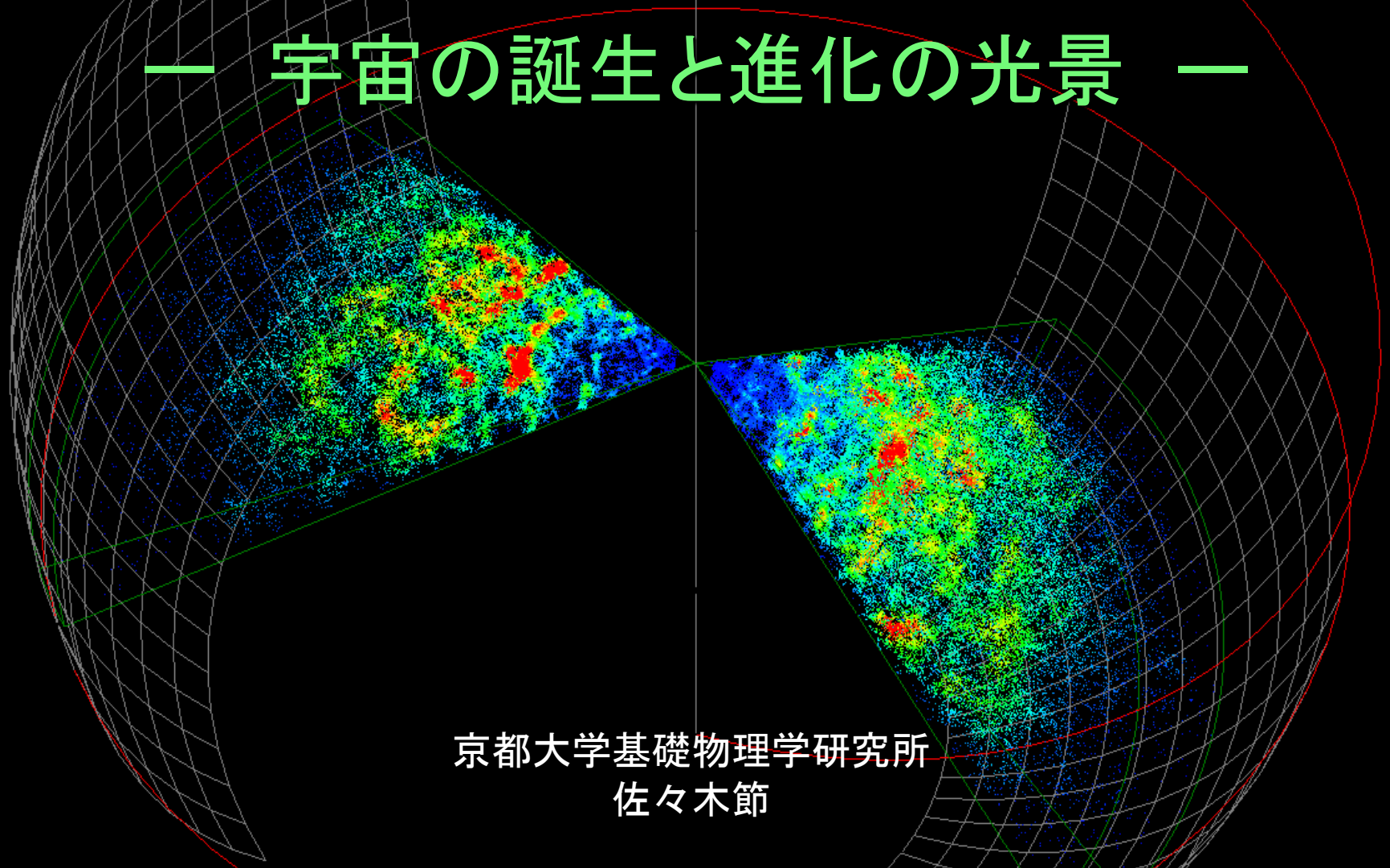


# 宇宙はどうやって始まったか？

— 宇宙の誕生と進化の光景 —



京都大学基礎物理学研究所  
佐々木節

# 現代物理学の2大理論

- 一般相対論

重力＝時空の幾何学 → 膨張する宇宙, ブラックホール

- 量子力学

物質＝粒子と波動の2面性 → 「真空」の揺らぎ, トンネル現象

一般相対論と量子力学の融合 = 理論物理学の最重要課題

## 量子宇宙論

宇宙誕生のカギを握る

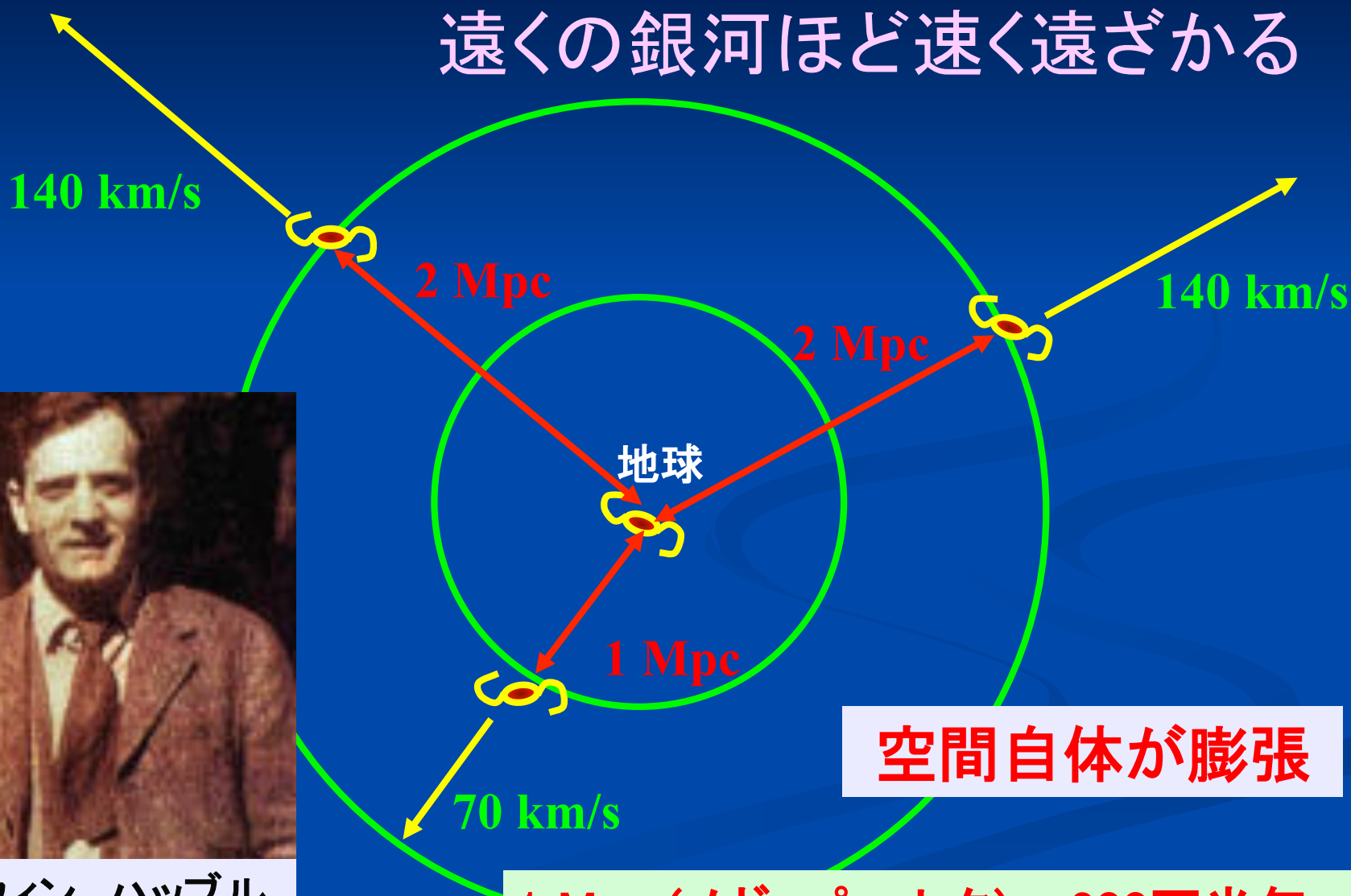
# 話の内容

- 宇宙の進化(ビッグバン理論)・・・確実に正しい
- インフレーション宇宙理論・・・多分正しい
- 量子宇宙論・・・理論的予想

# 膨張宇宙の発見

Edwin Hubble (1929)

遠くの銀河ほど速く遠ざかる



エドウィン ハッブル

1 Mpc (メガ・パーセク) = 300万光年

# 最近の観測による銀河分布

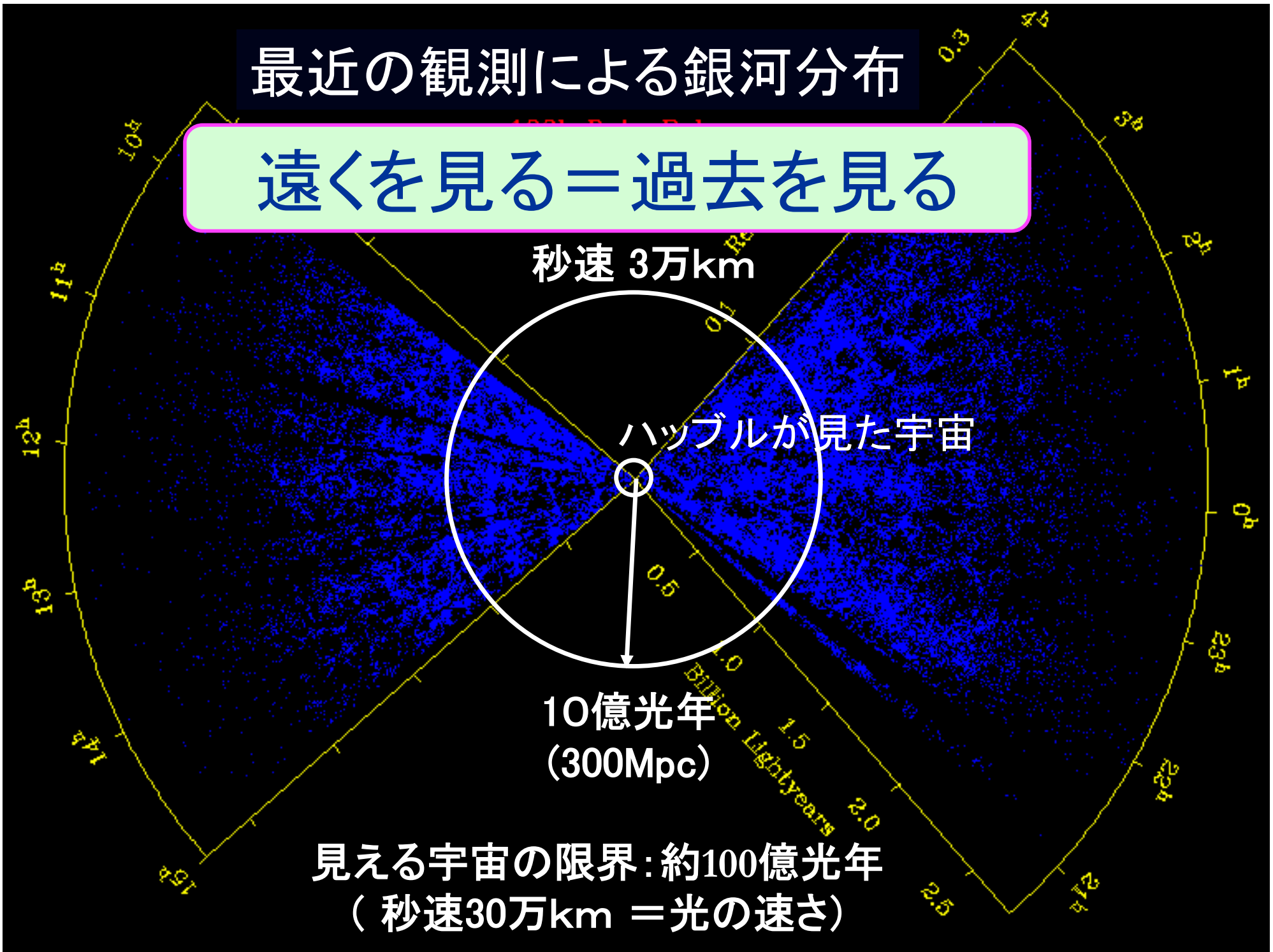
遠くを見る＝過去を見る

秒速 3万km

ハッブルが見た宇宙

10億光年  
(300Mpc)

見える宇宙の限界：約100億光年  
(秒速30万km = 光の速さ)



# アインシュタインの一般相対論

Albert Einstein (1915)



出所 [http://simple.m.wikipedia.org/wiki/File:Albert\\_Einstein\\_\(Nobel\).png](http://simple.m.wikipedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_(Nobel).png)

時間と空間(時空)の幾何学としての  
重力の理論

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時空の曲率

物質のエネルギー—運動量密度

$G = 6.7 \times 10^{-11}$  ニュートン・ $m^2 / kg^2$  (重力定数)

$c = 3 \times 10^8$  m/sec (光速)

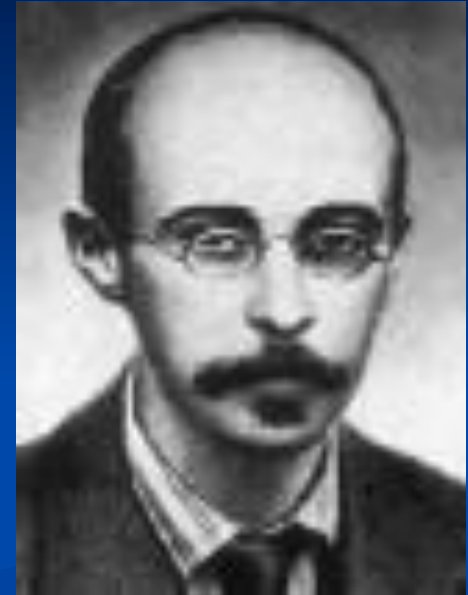
# フリードマン方程式 Friedmann (1922)

宇宙の膨張率

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

$\rho$  = 宇宙の質量密度

$G$  = ニュートンの重力定数



出所 [http://en.wikipedia.org/wiki/](http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Friedmann)

Alexander\_Friedmann

フリードマンの解：

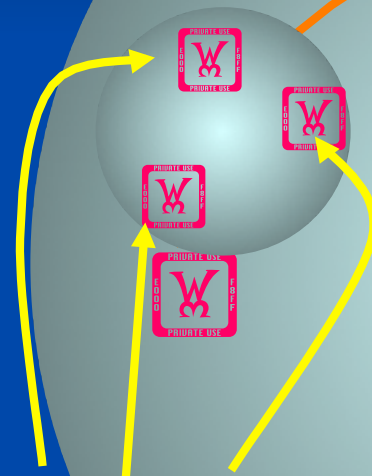
一般相対論に基づいた膨張宇宙モデル

**「空間」**が大きくなる

現在の宇宙の膨張率： $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$

# 風船宇宙モデル

風船の表面が宇宙  
(3次元空間を2次元球面で模倣)



銀河間の距離が大きいほど  
より速く遠ざかる

銀河

球面上の「点」が銀河



# 宇宙のはじまり

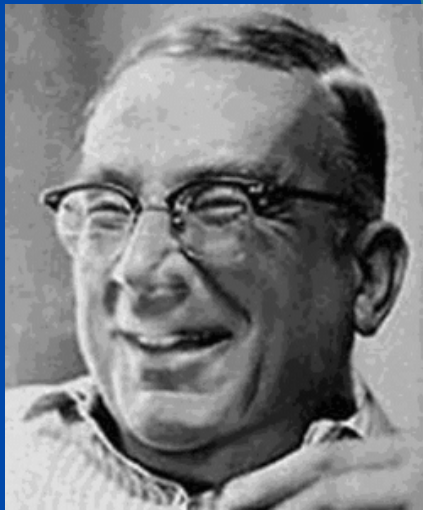
昔の宇宙は小さかった。

約130億年前には銀河は重なり合って  
個々の銀河のような塊でなく、物質が一様に分布

宇宙は超高温、高密度の状態からはじまった

## Big Bang !

ガモフの火の玉宇宙論 (1940年代)



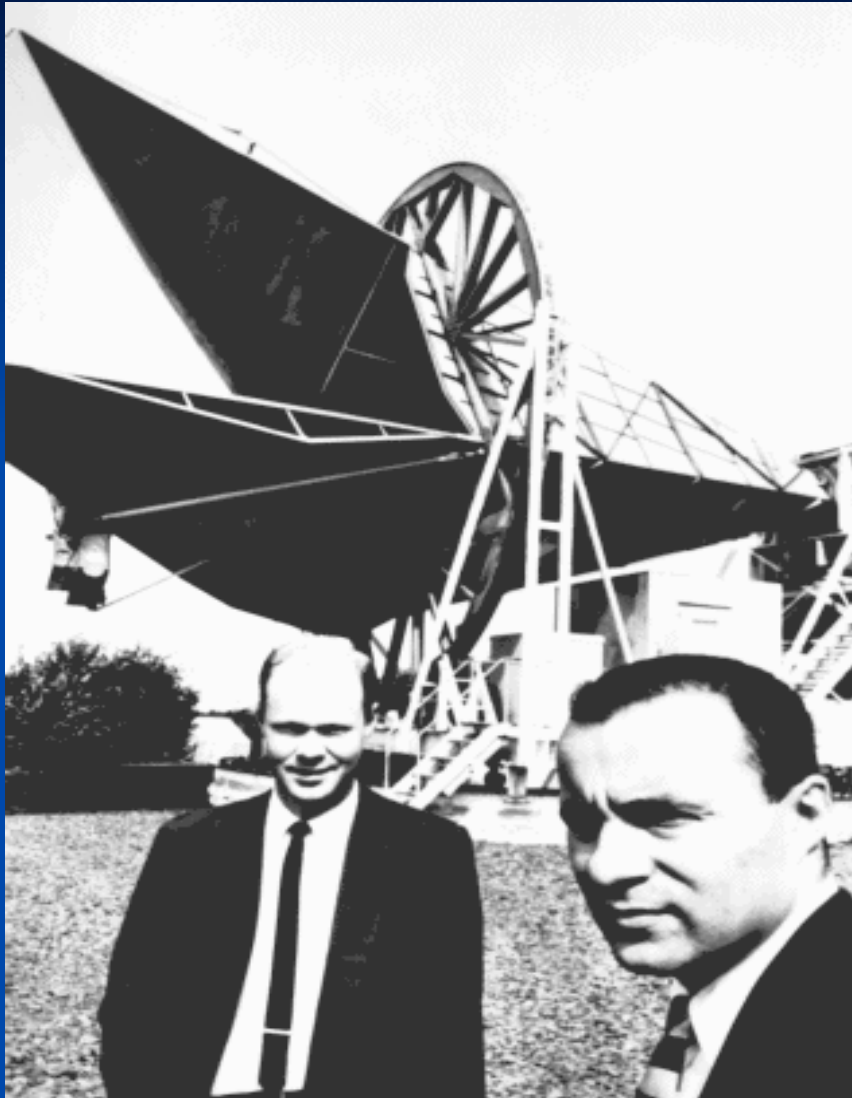
George Gamow

# 宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB) の発見

**Penzias & Wilson (1965)**

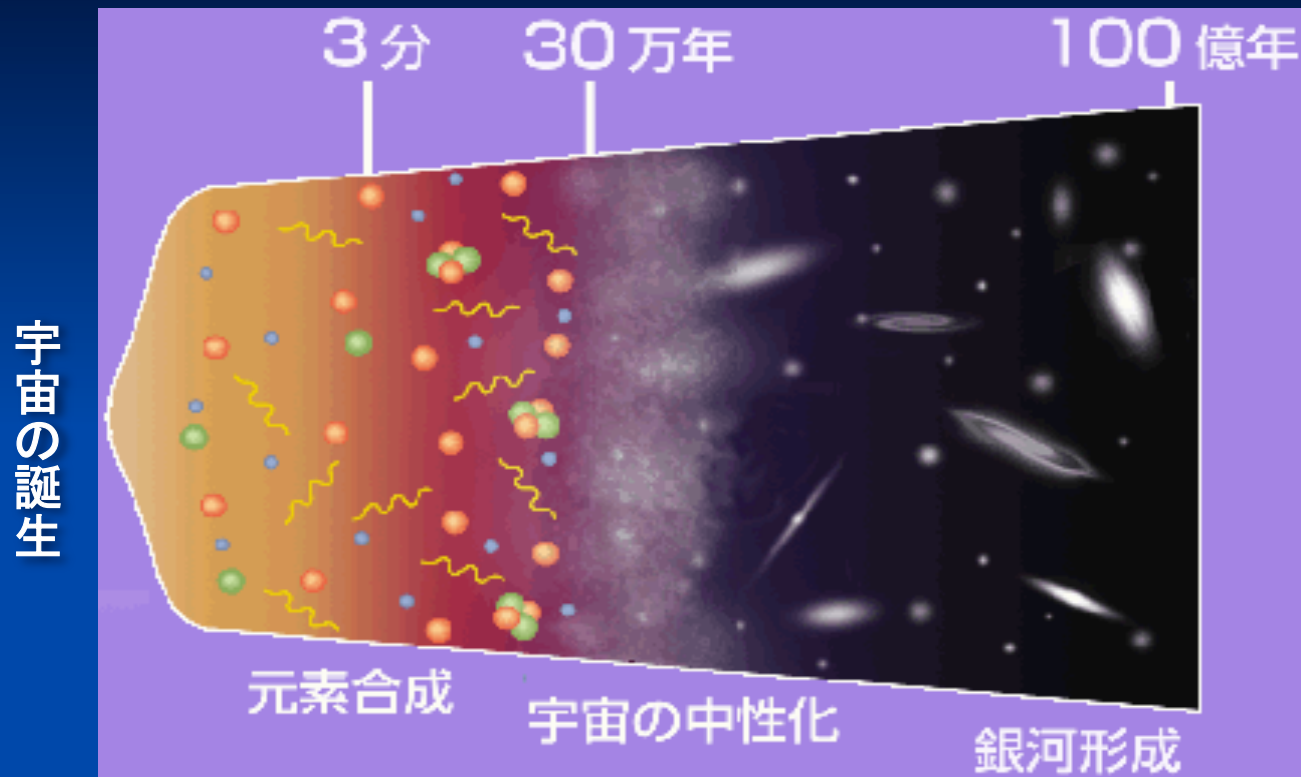
人工衛星による大陸間テレビ  
中継実験中に奇妙な雑音電波

宇宙がかって高温・高密度  
であった痕跡



Wilsonとペンジャス

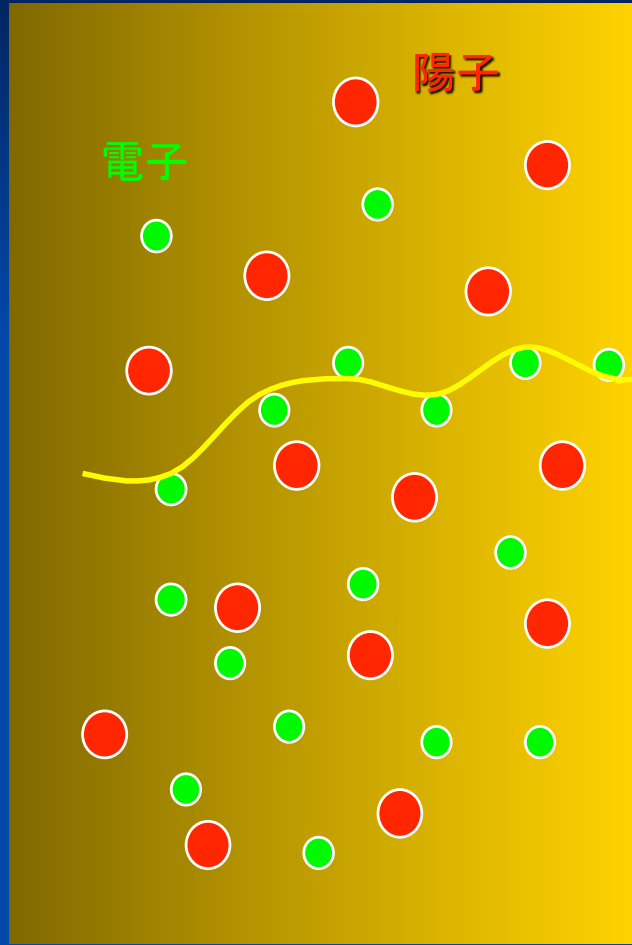
# ビッグバン宇宙の熱史



- 始めは光と素粒子の熱いスープ（電子, 陽子, ニュートリノ...）
- 最初の3分間でヘリウムなどの軽元素が合成される
- 30万年経って宇宙が晴れ上がる（温度は約1000 K）
- 約10億年経って星・銀河形成

# ビッグバン宇宙の晴れ上がり

プラズマ状態(蛍光灯の中と同じ)



陽子と電子が結合して中性化すると  
光は散乱せずそのまま進む

クエーサー

銀河

宇宙マイクロ波背景放射

晴れ上がり  
(宇宙の中性化)

ビッグバン

30万年

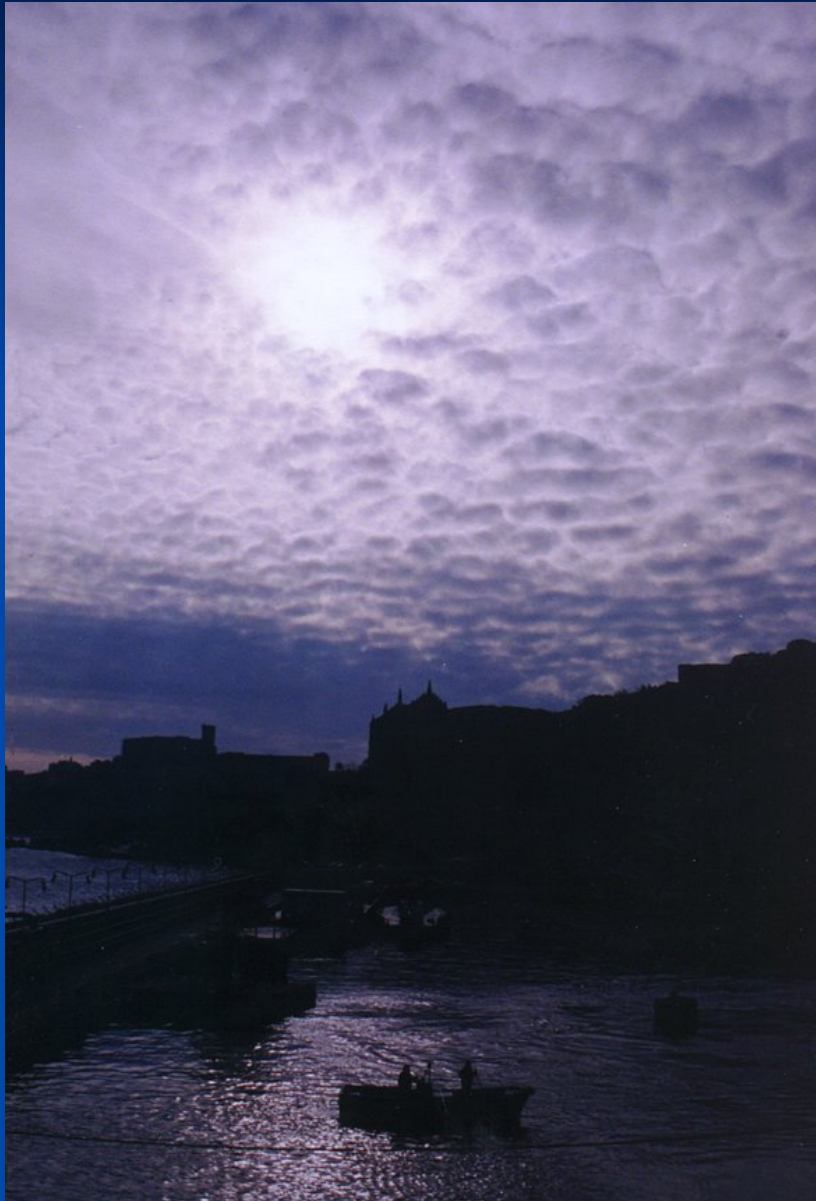
10億年

100億年

現在

時間

# 光(電磁波)で空(宇宙)を観測すると...



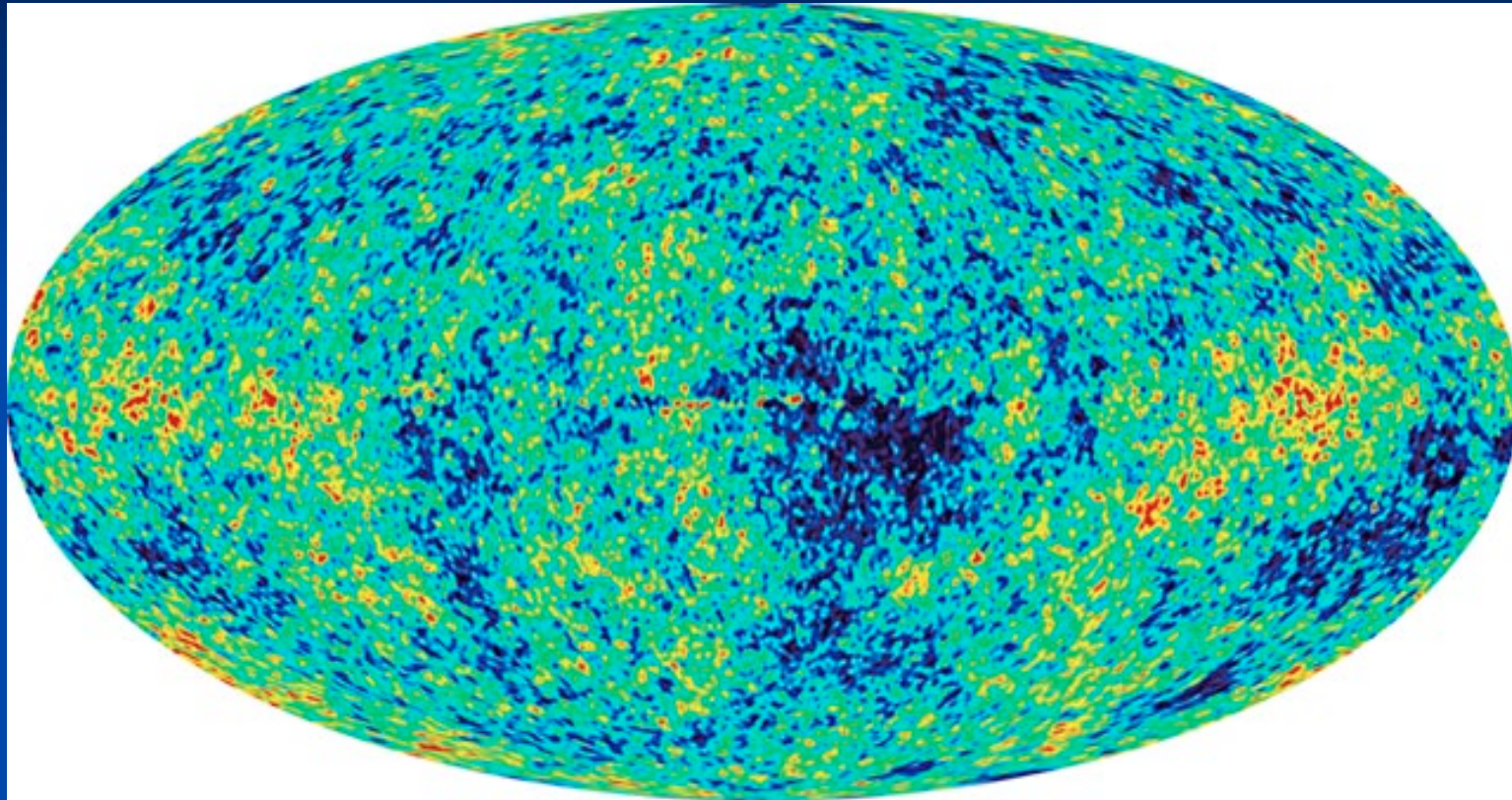
雲の表面  
(光が最後に散乱された面)  
しか見えない。



電波で見ると

宇宙の晴れ上がり面  
(30万歳の宇宙)  
が見える

# WMAP衛星が描く30万歳の宇宙地図 (宇宙の晴れ上がり面)



現在の宇宙を100歳とすると生後1日目の宇宙

赤い部分は温度がわずかに高く、青い部分はわずかに低い。  
青い部分が数十億年かけて銀河や銀河団に成長

# ビッグバン以前？

真空エネルギー (= 宇宙定数) による急激な膨張

インフレーション宇宙モデル(1980年～)



アラン・グース

出所 [http://www.edge.org/3rd\\_culture/bios/images/guth02.200.jpg](http://www.edge.org/3rd_culture/bios/images/guth02.200.jpg)



佐藤勝彦

出所 <http://www.nins.jp/~sato/inde-j.htm>



アンドレイ・リンデ

出所 <http://www.cita.utoronto.ca/index.php/Events-Calendar/Sackler-Lectures/2002-Andrei-Linde>

# 真空のエネルギー

- 偽の真空

物質は何も存在しないが、大きな潜在的エネルギー（真空のエネルギー）を持つ空間

- 真空は膨張してもエネルギー密度は変わらない


$$\text{全エネルギー} = \text{エネルギー密度} \times \text{体積}$$

膨張によって莫大なエネルギーが生まれる



# 宇宙のインフレーション

誕生直後の宇宙



$10^{30}$  倍以上



100000.....00000

0が30個以上

現在見えている宇宙のサイズ



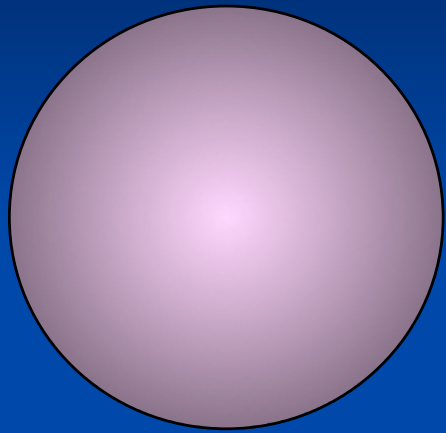
完全に平坦に見える

## 巨大な宇宙の誕生

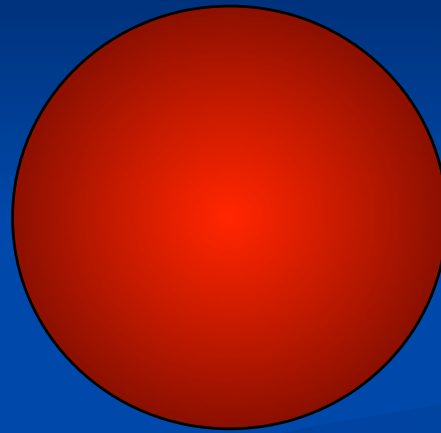
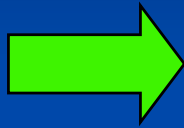
真空の量子揺らぎも大きく引き伸ばされて  
現在の銀河や銀河団などの種になる

# ビッグバン宇宙の誕生

インフレーション終了時に全エネルギーが熱に変換



冷たい宇宙




熱い

物質(クォーク, 電子, ニュートリノ)と光の誕生

宇宙誕生後  $10^{-34}$  秒の頃.

温度は約  $10^{28}$  K

  $\frac{1}{10^{34}}$  秒

# インフレーション宇宙の観測的検証

## 理論的予言

- インフレーション後の宇宙は、極めて良い精度で空間が平坦。
- インフレーション中の真空の量子揺らぎが、宇宙の密度揺らぎとなり、銀河や銀河団へと成長する。

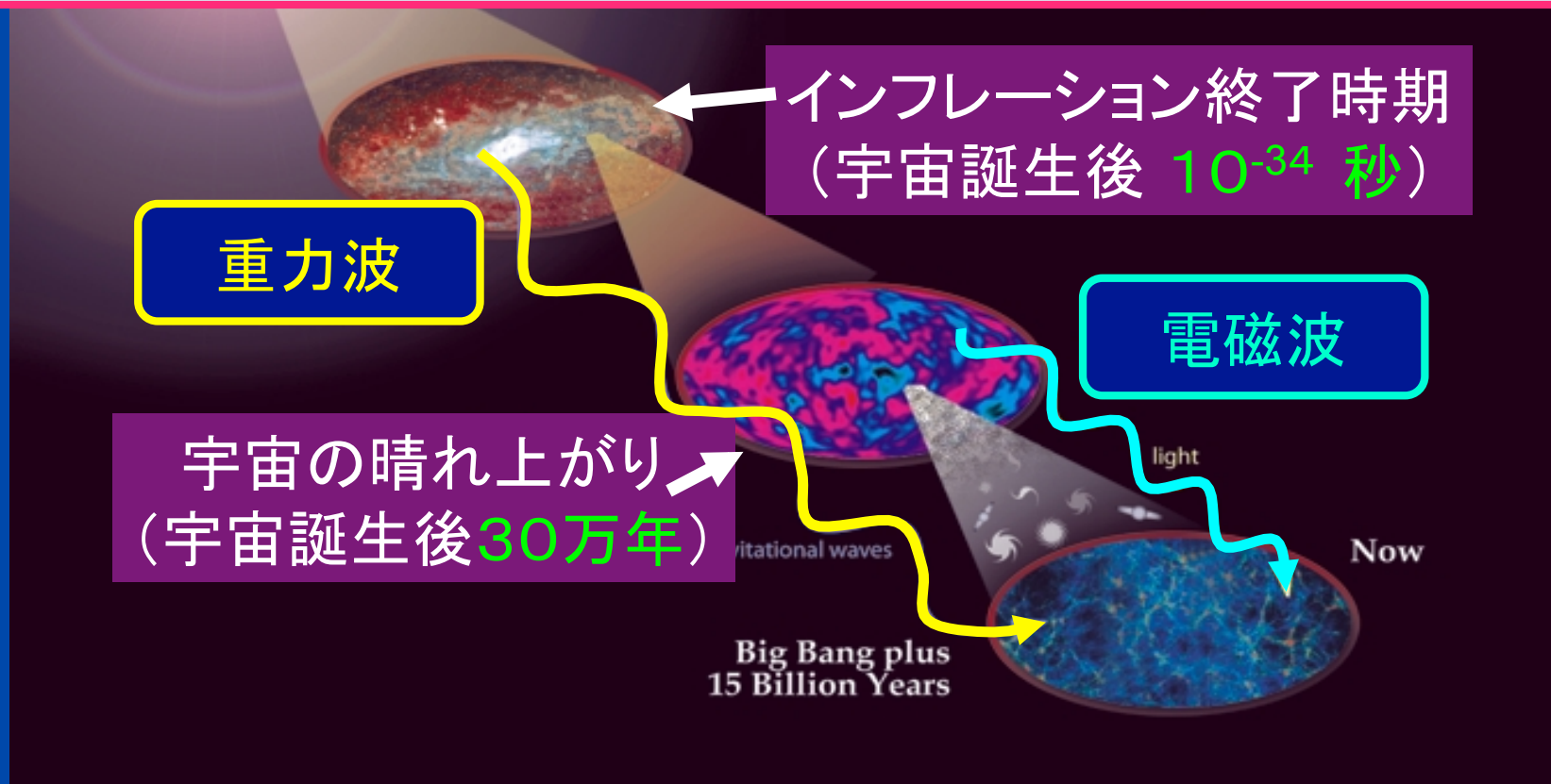
上の2つの予言は、最近の観測データと極めてよく一致

しかし、これらは間接的証拠(傍証)...

# 直接的検証？

- 真空の量子揺らぎの一部は**時空の波(重力波)**となり, そのまま現在の宇宙にその痕跡を残す.

重力波天文学 = 天文学の「最後のフロンティア」



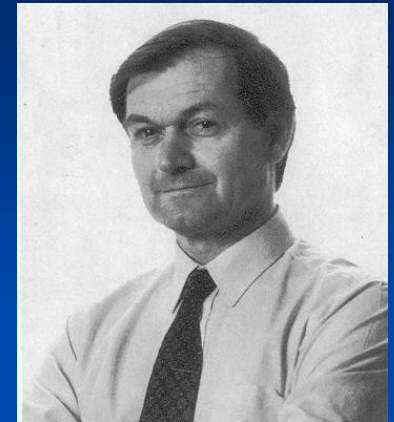
# インフレーション以前の宇宙？

ホーキング・ペンローズの特異点定理(1970)



Hawking

「宇宙は有限の過去に  
時空の特異点を持つ」



Penrose

宇宙の始まり=時空の特異点？

時空の特異点では物理法則が成立しない!?

一般相対論(古典論)が適用できない!

量子重力理論が必要

# 量子重力理論

一般相対論(時間と空間の発展)に量子力学の考え方を適用

完全な量子重力理論は未完成

超弦理論, M理論, . . .

近い将来, 完成すると期待されているが. . .

(川合光先生のお話)

# 量子宇宙論

宇宙全体の進化に量子力学を適用

- 宇宙誕生の量子重力的描像にせまる
- 量子重力理論の構築への第一歩

# トンネル現象

— 量子論特有の現象 —

古典論:



粒子は壁を越えられない

量子論:



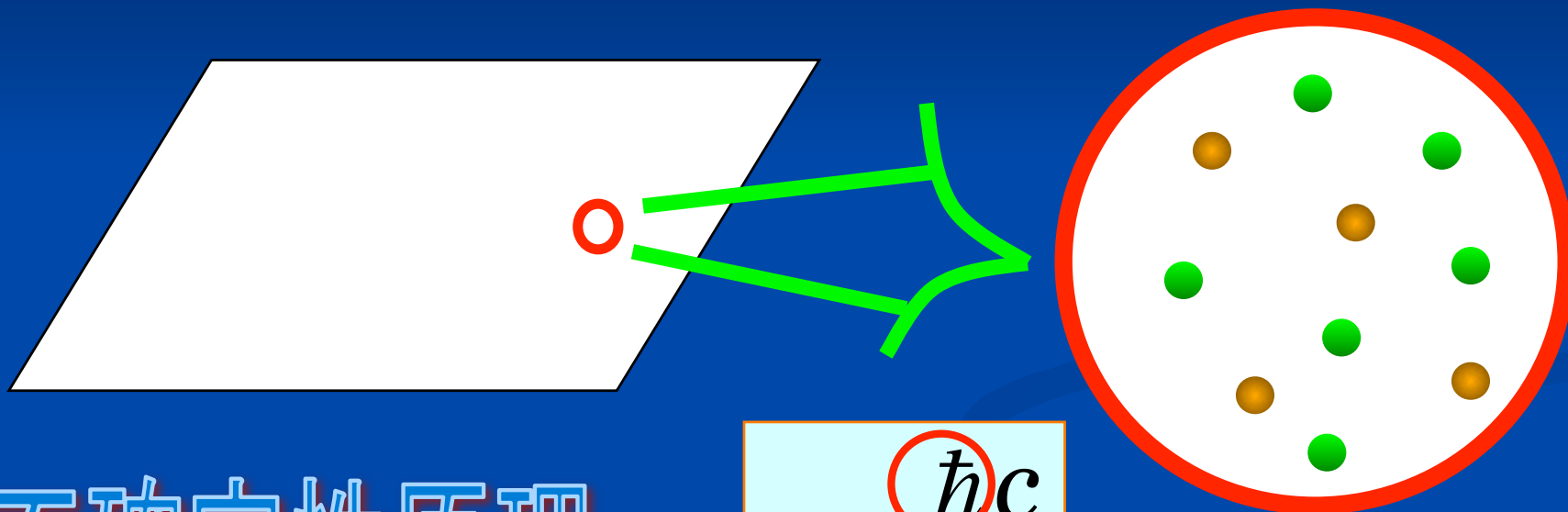
確率の波が少し染み出る

粒子は確率的に広がって存在

# 真空の量子揺らぎ

— 場の量子論固有の現象 —

- 真空は何もない静かな空間ではない。
- ミクロのレベルでは、素粒子が激しく生成消滅を繰り返している。



## 不確定性原理

$$E \geq \frac{\hbar c}{L}$$

プランク定数

$\hbar c = 3 \times 10^{-26}$  ジュール・メートル

サイズ  $L$  が小さいほどエネルギー  $E$  の揺らぎが大きい



# 量子重力の世界

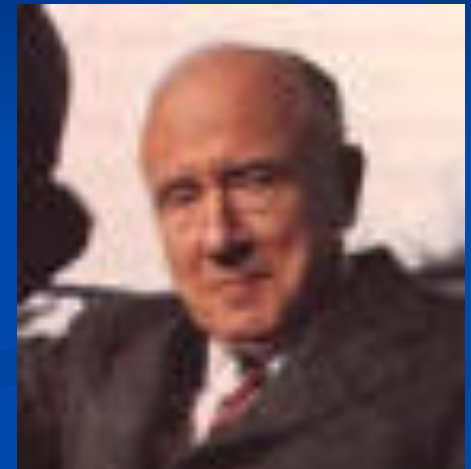
$$\frac{1}{10^{33}} \text{ cm}$$

時空を $10^{-33} \text{ cm}$ 以下のスケール(プランクスケール)で見ると  
ブラックホールやワームホールの生成消滅が激しく起きている



## 時空の泡

(スペース・タイム・フォーム)



ジョン・A・ウィーラー

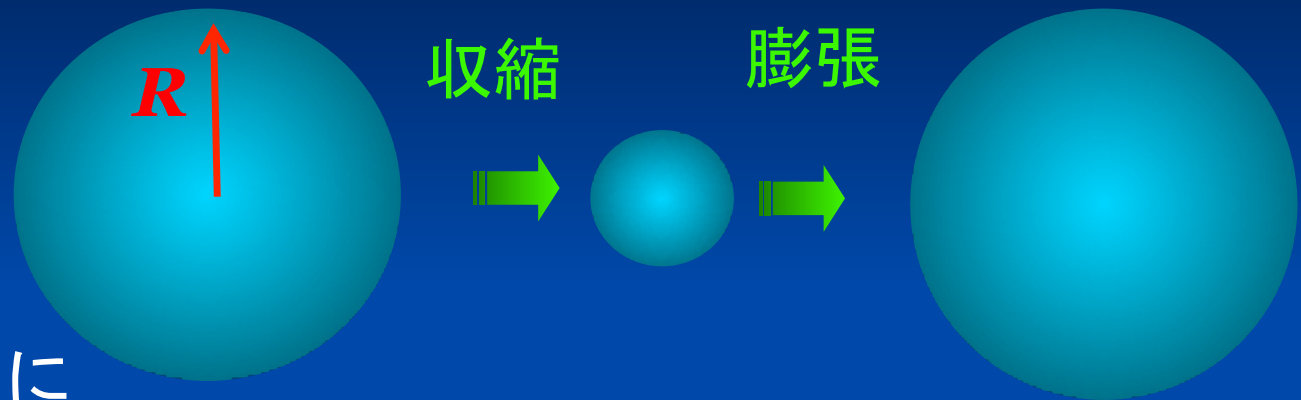
出所 <http://www.physics.sfsu.edu/~lwilliam/sota/worms/Scientists.htm>

- 宇宙の大きさが $10^{-33} \text{ cm}$ 以下のときは「宇宙全体」が量子論的状态

宇宙(=時空)の存在自体が確率的

# ドジッター宇宙解

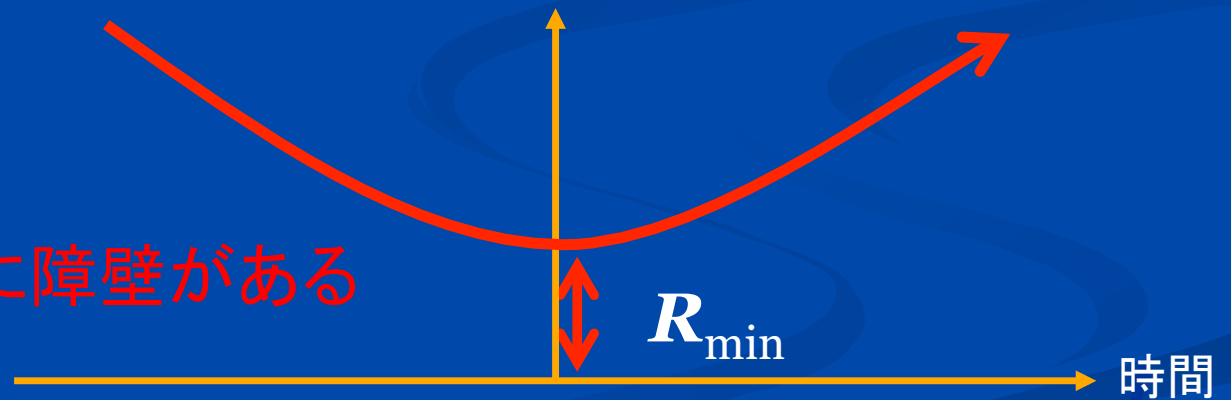
真空のエネルギー(宇宙項)で満たされたアインシュタイン方程式の解



宇宙の大きさ  $R$  に  
最小半径が存在

宇宙の半径

宇宙の半径の「運動」に障壁がある



量子論ではトンネル効果で、最小半径以下の宇宙も存在し得る

# 「無」からの宇宙創生説 Vilenkin (1982), Hawking, ...

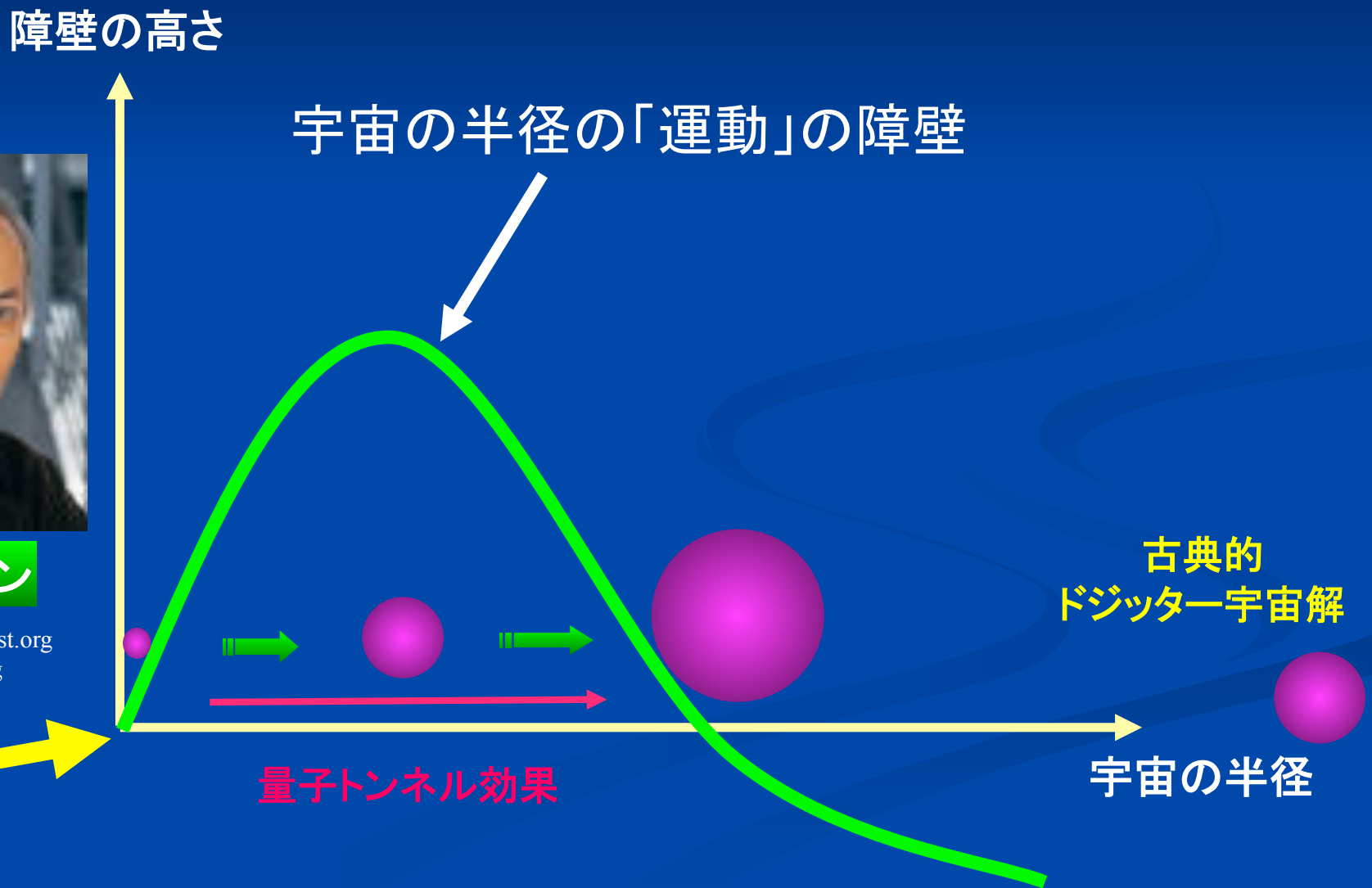
トンネル効果によって、半径が0の状態(無)から宇宙が生まれた



ビレンキン

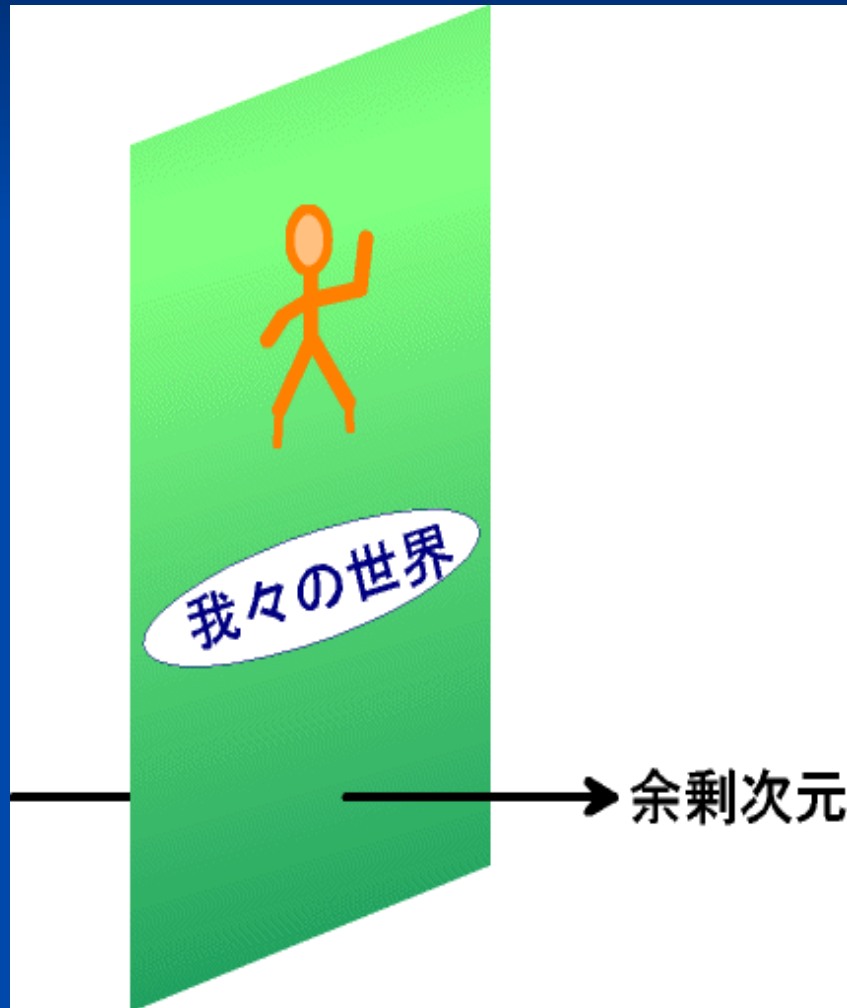
出所 <http://thoughtcast.org/podcasts/vilenkin.jpg>

無



# ブレーン(膜)宇宙論 brane = membrane (膜)からの造語

我々の宇宙は高次元空間の中の3次元の膜？



- 超弦理論やM理論が予言する世界
- ブレーン宇宙説では「無」からの宇宙創生を自然に説明できる.
- 宇宙がブレーン同士の衝突によって生まれた可能性もある.
- 宇宙誕生直後のインフレーションも自然に説明可能
- 近い将来に実験や観測によって理論の検証が可能(?)

# まとめ：「無」から「有」へ

- 無の状態から宇宙はトンネル効果で誕生した(だろう)
- 誕生直後の宇宙の半径はプランクサイズ ( $10^{-33}$  cm)
- その後、真空のエネルギーによって、宇宙はインフレーションを起こし、大きな宇宙が誕生し、真空のエネルギーが物質と光に転化した

## ビッグバン宇宙の誕生

物質の誕生，元素の合成，星・銀河形成，  
太陽系形成，生命の誕生，.....

# おまけ：宇宙の未来？

- 永遠に膨張し続ける場合

膨張し続けながら冷えて行く

宇宙の熱的死（空間だけが広がる「虚無」の世界？）

膨張が加速度的に早くなる

ビッグ・リップ（すべてが引きちぎられる？）

膨張しながら、新たな物質が生成され続ける

定常宇宙論（ビッグバン宇宙論の昔の対抗馬）の再現

- 膨張が止まり、収縮を始める場合

 ビッグ・クランチ（すべてが再び一点に潰れる）

宇宙の終わり？ 新たな宇宙の始まり？

あと1000億年ほど経つと（多分）わかります！