

# 最先端物理学が描く宇宙

# Frontiers of Physics & Cosmology

第12回 2025/12/8

量子論(3) 量子コンピュータ  
標準宇宙論 (1) ビッグバン標準宇宙論

真貝 寿明

Hisaki Shinkai



真貝の武庫川講義ページtop



<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/mukogawa/>

# 『光子の裁判』(1949) 朝永振一郎 (レポート課題 基礎資料)

光子の裁判  
—ある日の夢—

1

検 「それでは被告にたずねるが、被告は前から室内にひそんでいたのではないといふのやあるか」  
被 「そうです。私がその直前に部屋の外にいたところには確かに証拠があります。現にその直前、私は門のところにいたのです。すなわちそこで門衛が私をつかまえて、入門の手続きをとらせたのであります。このことはさきほど門衛の証言で明らかにされたとおりです」

検 「なるほど。門衛の証言によってその点についてはアリバイが成立しているとせねばなるまい。それでは聞くが、被告は門から前庭を通って窓のところに行き、その窓から室内に侵入し、そして室内の壁のところで捕えられたというのだね」

被 「そのとおりです」

検 「気がつくと私は、何かの裁判を傍聴しているようです。法廷はよく写真などで見たように、正面に判事長が威儀を正して坐つており、中央の被告席には何の犯罪かよくわからないけれども、何かの犯行をおかしたらしい被告が神妙にひかえています。今尋問をしているのは検察官らしく、犯行の模様をいちいち念をおすよう聞きだしているのです。

私は、いつのまにこんなところにやってきたのであります。それをいぶかりながらも、これは何か面白い事件らしいぞと思いながら、一生懸命に聞き耳をたてていました。検察官はさらに尋問をつづけました。

検 「その部屋には一つの窓が前庭にむいて並んでいる。被告はそのどちらの窓から侵入したのか。この点は非常に重要なことだから、はつきりと答弁してほし」

これに対する被告の答は、はなはだ奇想天外なものでありました。

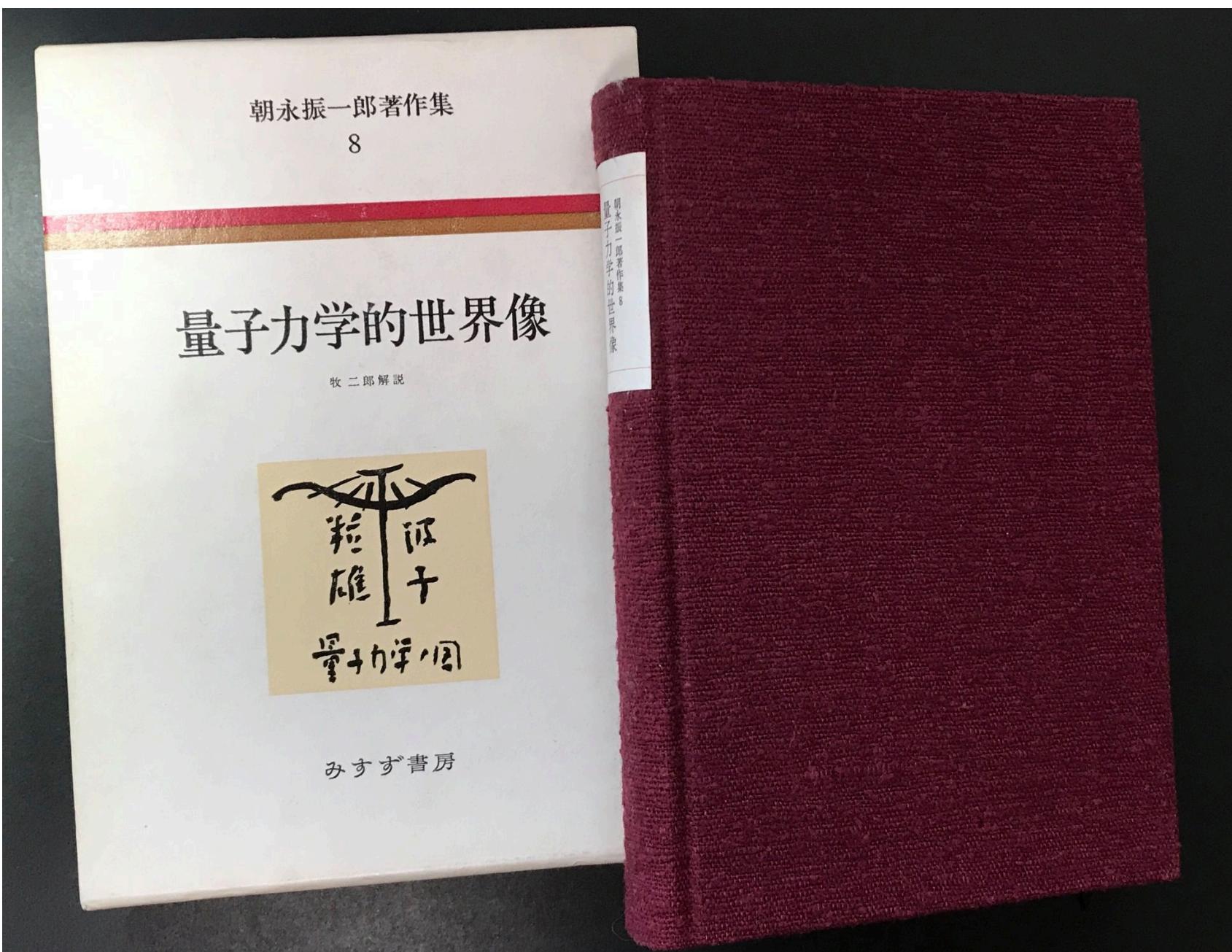
被 「私は一つの窓の両方を一緒に通つて室内に入ったのです」

私はこの答にあつけにとられました。一体、一人の被告が一つの窓の両方と一緒に通るなどということが可能でしょうか。検察官もこの論理を無視した答に少なからず心証を害したようです。

検 「被告は一つの窓の両方を一緒に通つたと予審においても一度ならず主張していましたが、ここで

"We must now describe the photon as going partly into each of two components into which the incident beam is split."

P. A. M. Dirac, *Principle of Quantum Mechanics*



朝永振一郎 (ノーベル賞 1965)

「超多時間理論」と「くりこみ理論」，  
量子電磁力学分野の基礎的研究

jointly to Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger and Richard P. Feynman "for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles".

## 課題

- 「光を波と考えるか、粒子と考えるか」の論争点は何か。現状ではどう理解するのが正しいか。
- 朝永振一郎の書いた『光子の裁判』(1949) のプリントを第9回の授業時に配布しています。この要旨をまとめてください。
- そして、次のキーワードから2つ以上を使って、論争点と解決案を説明してください。  
『神はサイコロをふらない』「確率解釈」「不確定性原理」「観測問題」「シュレーディンガーの猫」「EPR パラドックス」「トンネル効果」「コペンハーゲン解釈」「多世界解釈」
- 最後に、皆さんこの問題に関する感想をお願いします。

## 作成要領

- A4用紙3-5枚程度。表紙は不要。必要であれば、図や表を添付してよい（ページ枚数に含める）。
- 参考とした文献(webページ含む)は必ず記すこと。（剽窃、無断転載行為が判明したら受理しない。きちんと引用するならOK）。

レポートで満点を取らなければいけないですか?  
アドバイスをうけさせていただけます。

## 提出手順

- Google Classroomの課題として提出。手書きの場合は写真撮影したものを提出。
- 提出〆切は、**2025年12月28日（日）23:59**
- 提出ファイルの名前は、「Q 学科 XXXXXXXX ○○○○」の形式とすること。（QはQuantumの頭文字でレポート区別するためのもの、学科は大日/短生など2文字で、XXXXXXXは学籍番号、○○○○は氏名）とすること。ファイル名には空白を入れず、学籍番号は半角で、一括ダウンロードして読むため、このファイル名でお願いします。
- ファイル内の初めにも、タイトル・学部学科学年・学籍番号・氏名を記載すること。
- pdfファイルが望ましいが、wordファイルでもよい。

締め切りを守ること  
ファイル名などのフォーマットを守ること  
必要な図は添付すること  
参考文献を提示し、引用部分を明らかにすること

不確定性原理を考えていたら、量子論は物理学なのか哲学なのか  
分からなくなってきた。  
レポートで書くのはとても難しいと思うが、何とか自分なりに  
考えたいです。

## 第3回レポートは

2026年1月30日(金)23:59

- レポート課題（第3回）は、1月30日（金）23:59 締め切りです。3つ課題を出して30点満点とする予定ですが、そのうちの一つは、「この講義で扱ったトピックについて、自分で問題を考えて、解答例を示せ。」となる予定です。

「相対性理論をつくったのは誰か」「答え アインシュタイン」のような簡単すぎる問題では、10点満点は無理、とします。

【話題】

# 12月20日/21日に、天文文化研究会、「天文と文化」企画展、フォーラム

20日(土)午前 天文文化研究会

20日(土)午後 フォーラム

21日(日) 天文文化研究会

20-21日 「天文と文化」企画展

@大阪工業大学梅田キャンパス(大阪駅5分)

天文文化研究会と日本天文考古学会  
合同企画フォーラム

## 天文から文化を読む、天文で遺跡を解く ～天文文化研究会と日本天文考古学会の試み～

天文文化研究会と日本天文考古学会は、研究成果を共有し、両者の今後の研究に活用するための上記フォーラムを企画します。ご興味ある方の参加を歓迎いたします。

●プログラム

第一部 講演 天文文化研究会  
「設立趣旨と活動概要」松浦清（大阪工業大学）  
「天文学と文化」玉澤春史（東京大学/京都市立芸術大学）  
「天文と文学」横山恵理（大阪工業大学）

第二部 講演 日本天文考古学会  
「設立趣旨と活動概要」柳原輝明（学会常務理事）  
「世界と日本の天文考古学遺跡」平津豊（学会常務理事）  
「白石の鼻巨石群と石舞台の太陽観測」篠澤邦彦（学会常務理事）

第三部 パネルディスカッション  
司会 真貝寿明（大阪工業大学）

●日時：2025年12月20日（土）13:00-17:00  
●場所：大阪工業大学 OIT梅田タワー  
セミナー室204（オンライン同時配信）

参加登録は、12月17日（水）正午〆切。右のQRコードよりお願いします。

会場参加は80名までとさせていただきます。

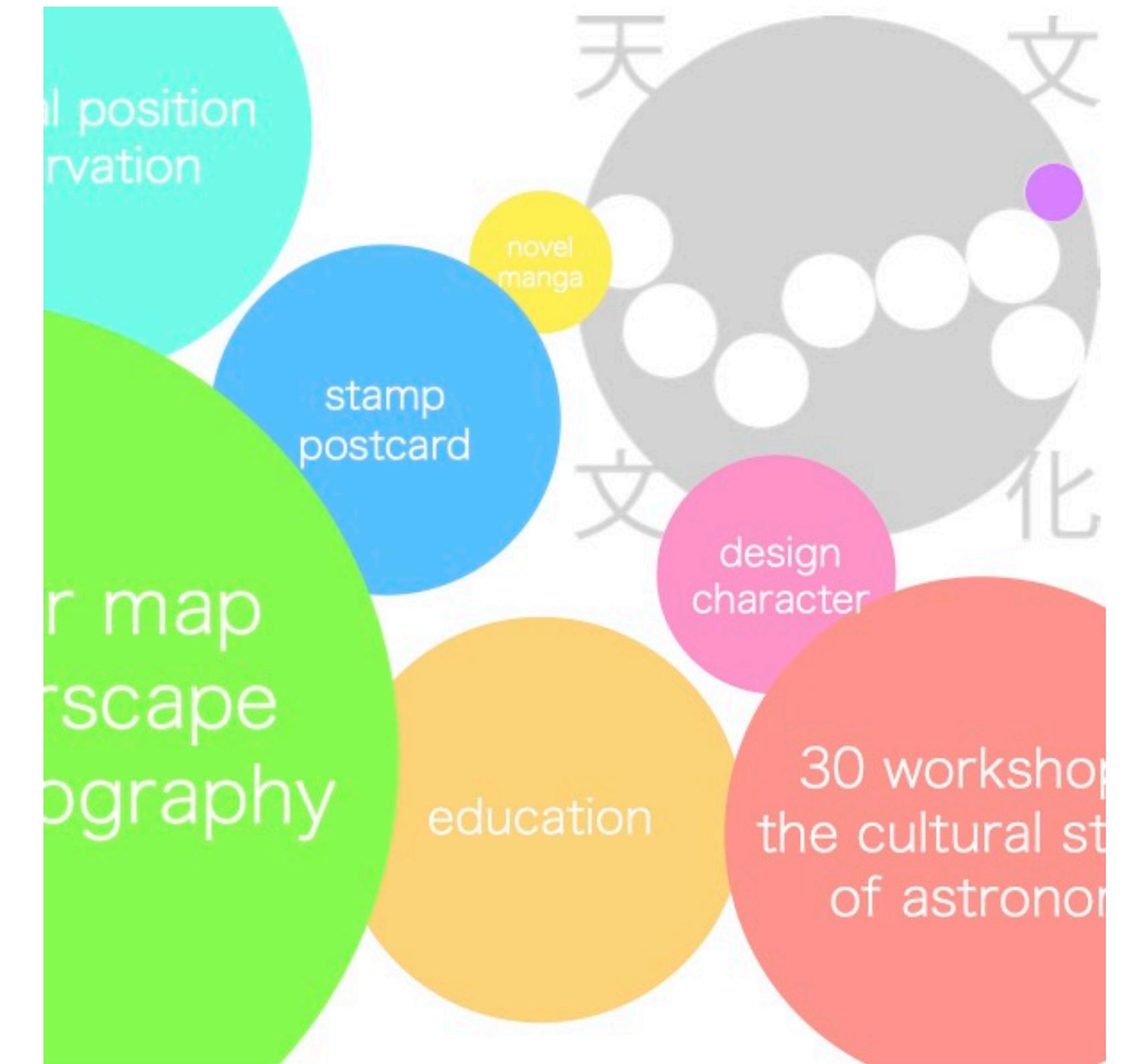
第30回天文文化研究会を同キャンパスで12月20日午前と21日に行います。

梅田キャンパス1階ギャラリーで、企画展「天文文化研究会30回の歩みと生活の中の天文学」（無料）を行います。

本企画は、科研費・挑戦的研究（開拓）「天文文化学の新展開：数理的手法の導入で文化史と科学論から自然観を捉える研究の加速」（2024-2028年）の活動の1つです

天文文化研究会ページ

<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/tenmonbunka/index.html>



第2回「天文と文化」企画展  
天文文化研究会30回の歩みと  
生活の中の天文学

Exhibition Commemorating the 30 workshops of the Cultural Studies of Astronomy:  
—Astronomy in Everyday Life—

2025年12月20日 (Sat.) 9:00-19:00  
12月21日 (Sun.) 9:00-15:00

大阪工業大学 OIT梅田タワー 1階ギャラリー、入場無料  
〒535-8585 大阪市北区茶屋町 1-45 | URL: <http://www.oit.ac.jp>

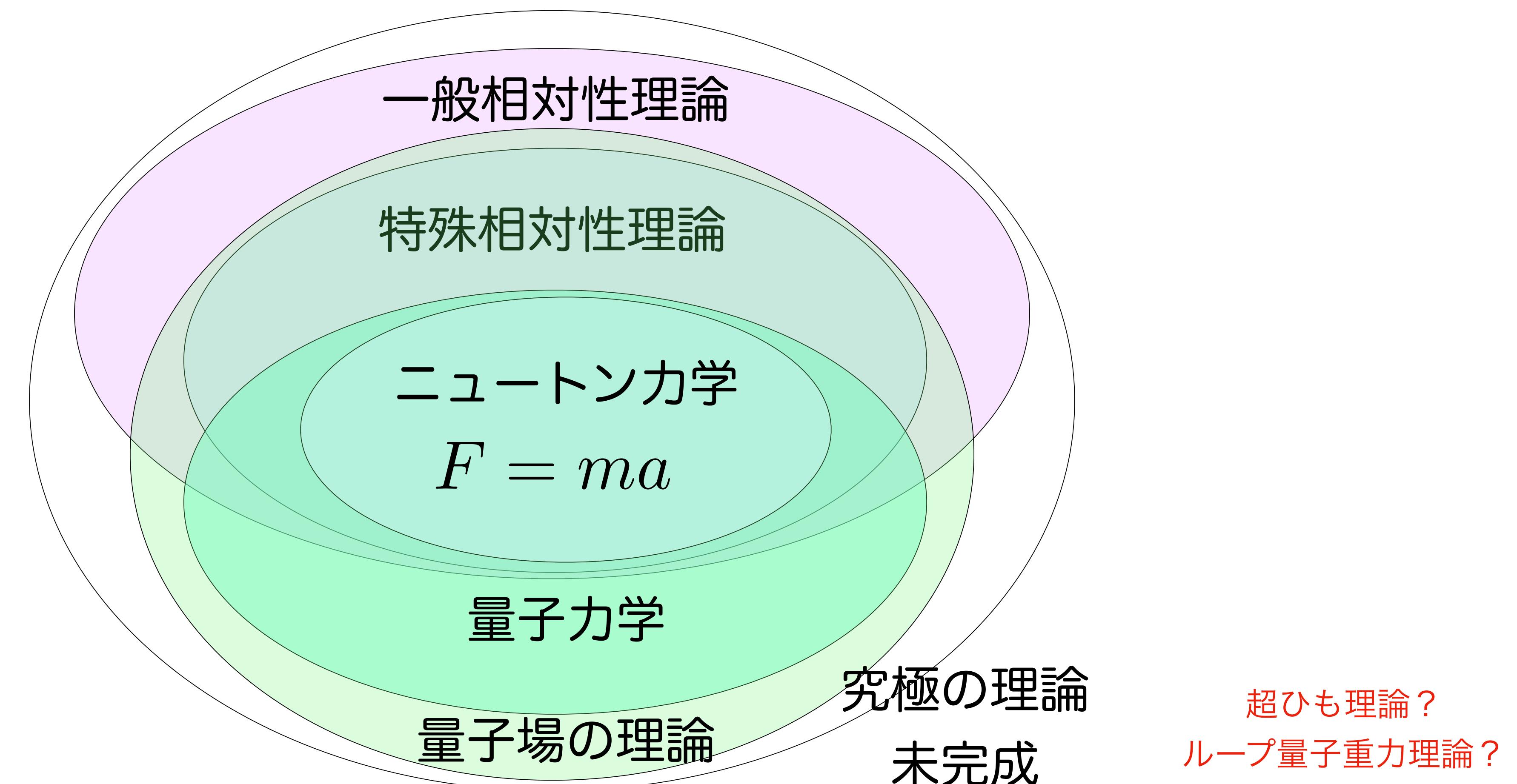


大阪工業大学  
OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

本企画は、科研費・挑戦的研究（開拓）「天文文化学の新展開：数理的手法の導入で文化史と科学論から自然観を捉える研究の加速」（2024-2028年）の活動の1つとして開催するものです。  
<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/tenmonbunka/index.html>

# 前回のミニツツペーパーから

今日の講義で相対性理論と量子論という相容れない二つの理論が世界が成り立つという事実を理解でき、物理学にはまだまだ大きな探究テーマを残しました。



# 前回のミニツツペーパーから

今日の授業はとくに難しいと感じた。  
前半は数学のようで、後半はアインシュタインと  
ボーアの論争に終わりがよく、互いに意図が  
強いため、大変だった。

命の力学論争やボーアとアインシュタインの内容前回からまだ興味を抱く  
いたが、命の力学論争の内容を一度理解すれば難しくないで

波  
粒子か電子かでこれまで長期間論争になっていることを知った  
こともあっただ。

3 アインシュタインとボーアがずっと議論していくことを  
矢張り、同じくらいの熱量で物理の話ができることは、  
とても良いことではなと思った。

2重スリットの干渉図に好いの考察は、普通に文を読んでも  
理解ができない。理解したと思ったも、それに好んで補充が付されるので、  
結局どうしたことなんだと思ってしまいます。いい十種類あります。

面白い講義でした。

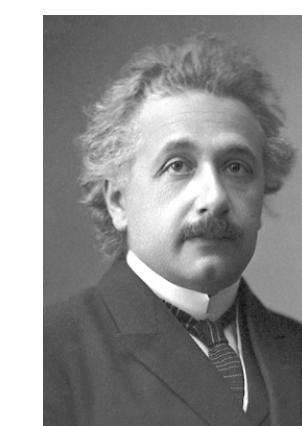
何もほい日本代から量子力学とか考えることかすこいなって思った。

4. 現代物理2:原子・素粒子の理論(量子論) 4.5 アインシュタイン・ボーア論争

教科書p145

## アインシュタインとボーア

Albert Einstein



1927年時 48歳

孤高のスーパースター

1921年ノーベル物理学賞  
「光電効果の解明」

Niels Bohr



1927年時 45歳

原子物理学のゴッドファーザー

1922年ノーベル物理学賞  
「原子構造の解明」

59

色々と考えが難いなって感じます。

# 前回のミニツツペーパーから

昨年「SN 2024ggi」これが爆発した。これは、今から2200万年前に起きた事成今、見えて、面白いと思った。

SN xxxxは、超新星爆発のことですね。  
遠方の星を見ることは、それだけ過去のものを見る、  
ということになります。  
今日の宇宙論では、そのような観測の前提を理解し  
ておくことが必要です。

そもそも宇宙とは何なのでしょうか？

これから新しい宇宙の理論やアーティクルなどもたくさんあります。

宇宙論の授業、楽しそうです！

次回からの宇宙論も楽しみです。

宇宙論が樂しそう。

2限の授業もレポート課題の内容は難しいですか？

# 光粒子仮説(光を粒子と考える理由)

- 溶鉱炉の温度の問題

光のエネルギー分布は、光のもつエネルギーには最小単位があると考えると理解できる(プランク, 光量子仮説)

- 光電効果の理論

金属に光を当てるとき電子が飛び出す。  
どんなに弱い光でも、ある振動数以上の光ならOK.

→ 光を粒子と考える(アインシュタイン, 光子仮説)

→ 光は質量ゼロの粒子

光のエネルギーEは、 $E=h\nu$ =プランク定数 × 振動数

# 原子模型の謎, 輝線スペクトルの謎

解決！

- ラザフォードらの実験

$\alpha$ 粒子を当てるとき, 散乱角が大きいときがある.

→ 原子には, 核がある.

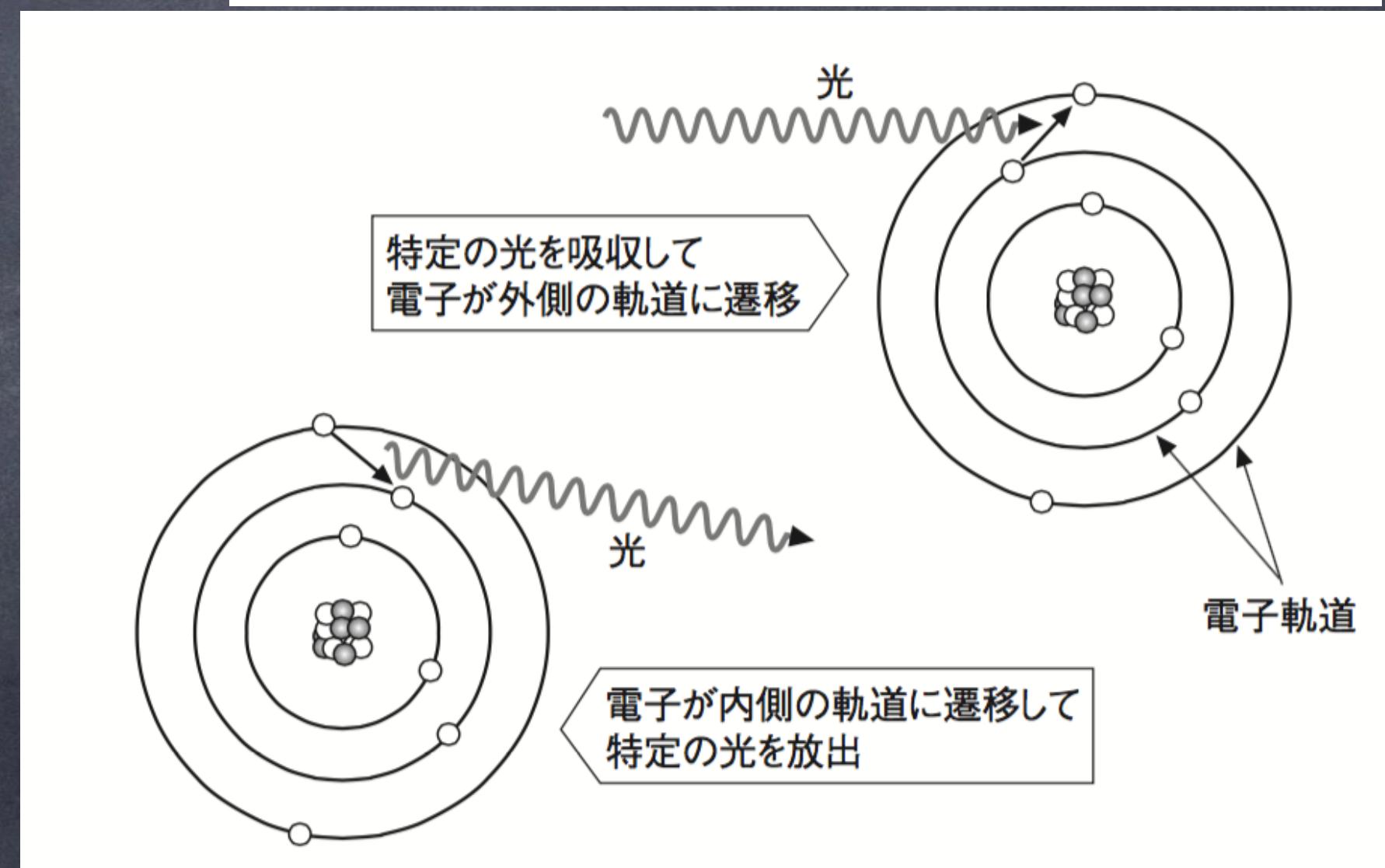
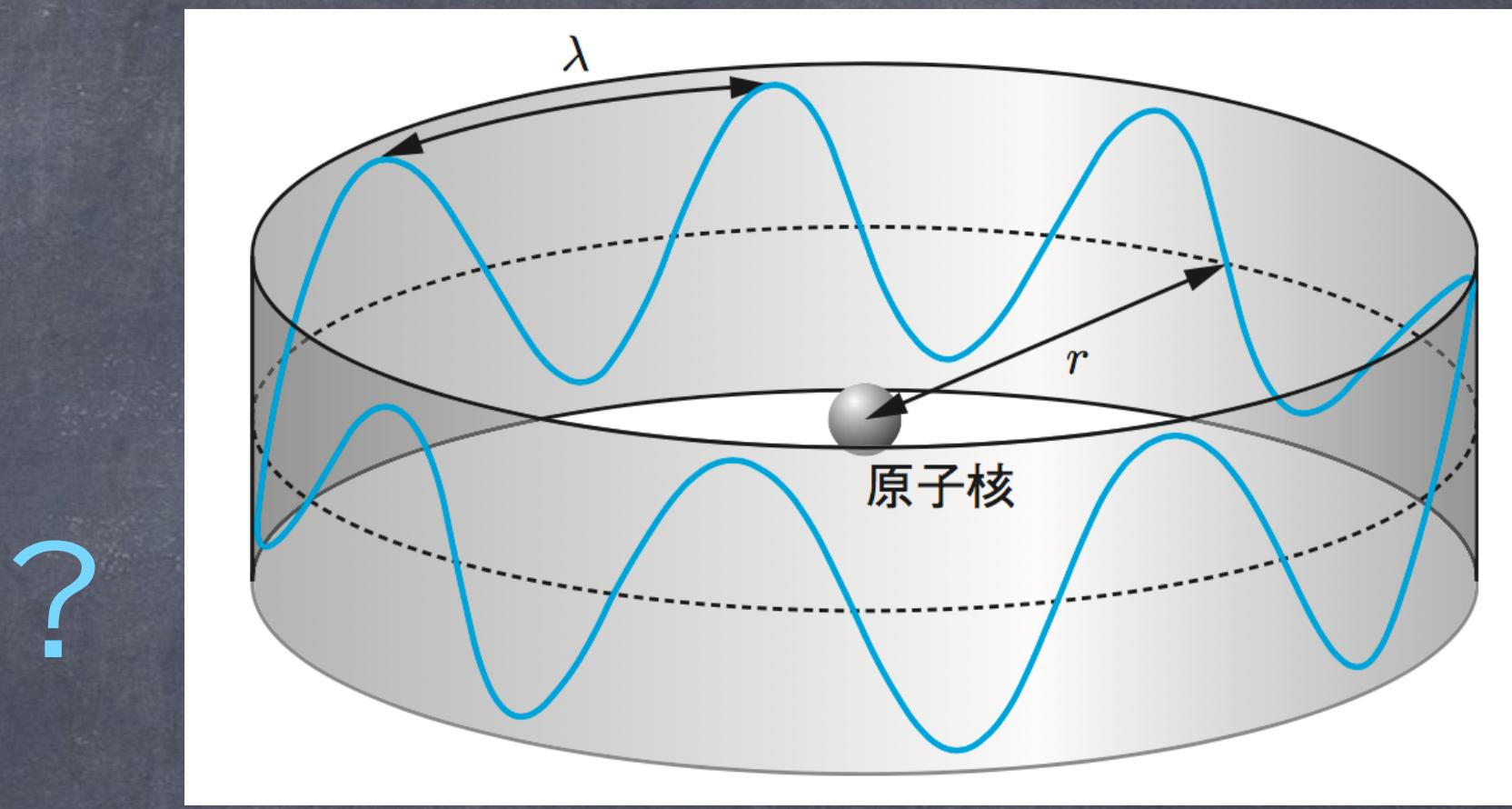
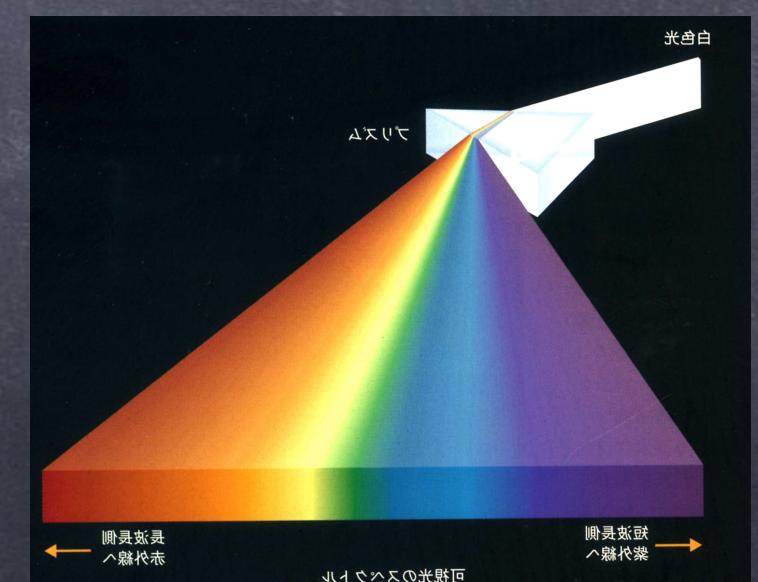
→ 電子が核のまわりを回り続けるのは何故か?  
(すぐに落ち込んでしまうはず)

→ 電子は軌道が決まっている(ボーア)

- 水素の輝線スペクトル

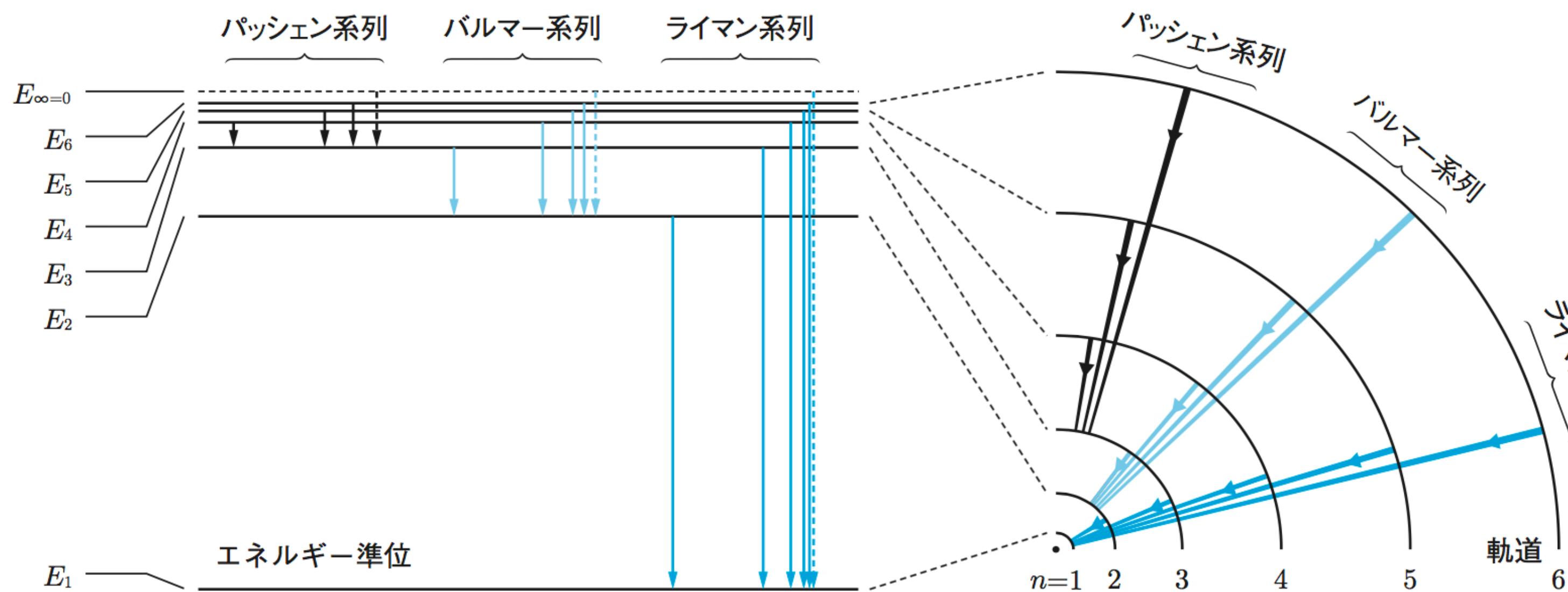
決まった振動数(波長)の光が発生

→ 何故か?



→ 電子が軌道間を遷移することで, 光を発したり, 吸收する. (ボーア)

## 4.2.3 ボーアの原子モデル



Niels Bohr  
(1885-1962)

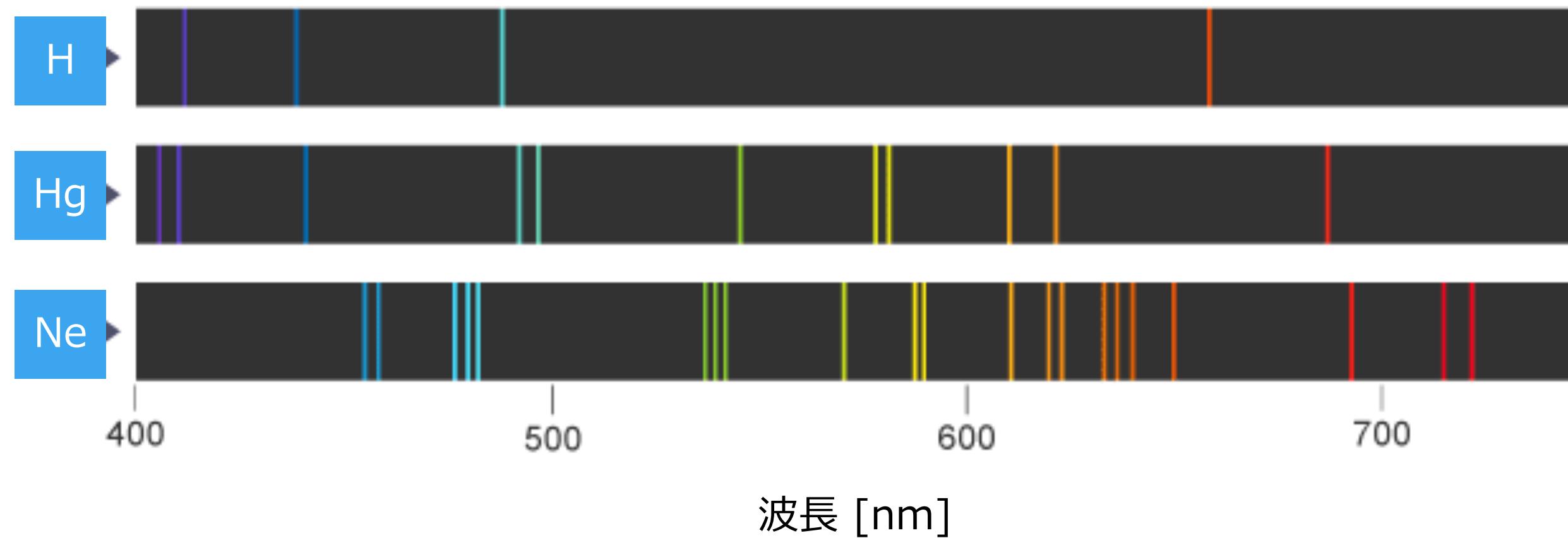
### ボーアの仮定2：振動数条件(1913年)

電子はとびとびに存在する軌道間を移ることがあり、そのときは、軌道間のエネルギー差（各軌道のエネルギー準位の差）に相当する光子を吸収あるいは放出する。 $n$ 番目と $n'$ 番目の軌道を遷移するとき、エネルギー差は次式で与えられる。

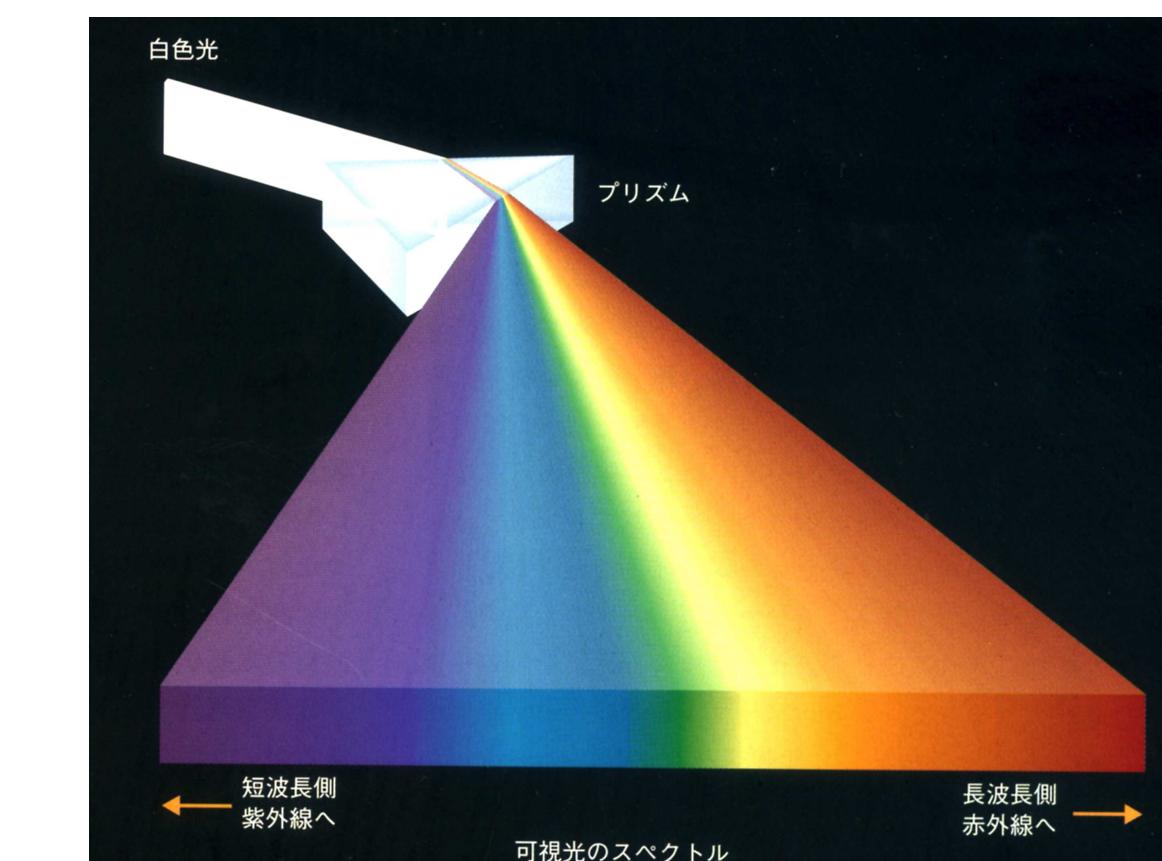
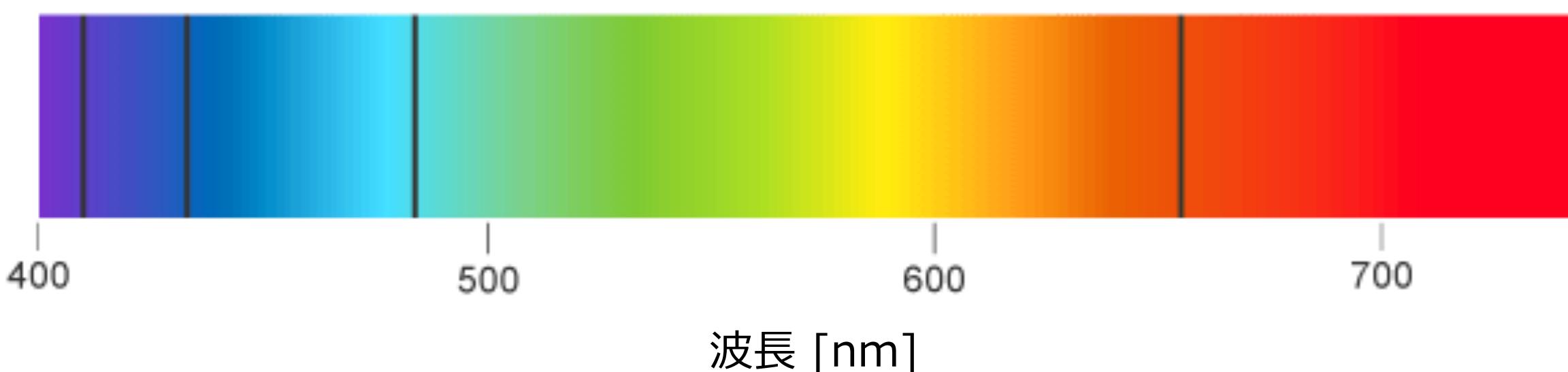
$$E_n - E_{n'} = h\nu \quad (E_n > E_{n'}) \quad (4.11)$$

# 輝線スペクトル・連續スペクトル

(a) 元素が放つ輝線スペクトル



(b) 水素原子による暗線（吸収線）が見られる連続スペクトル



問題

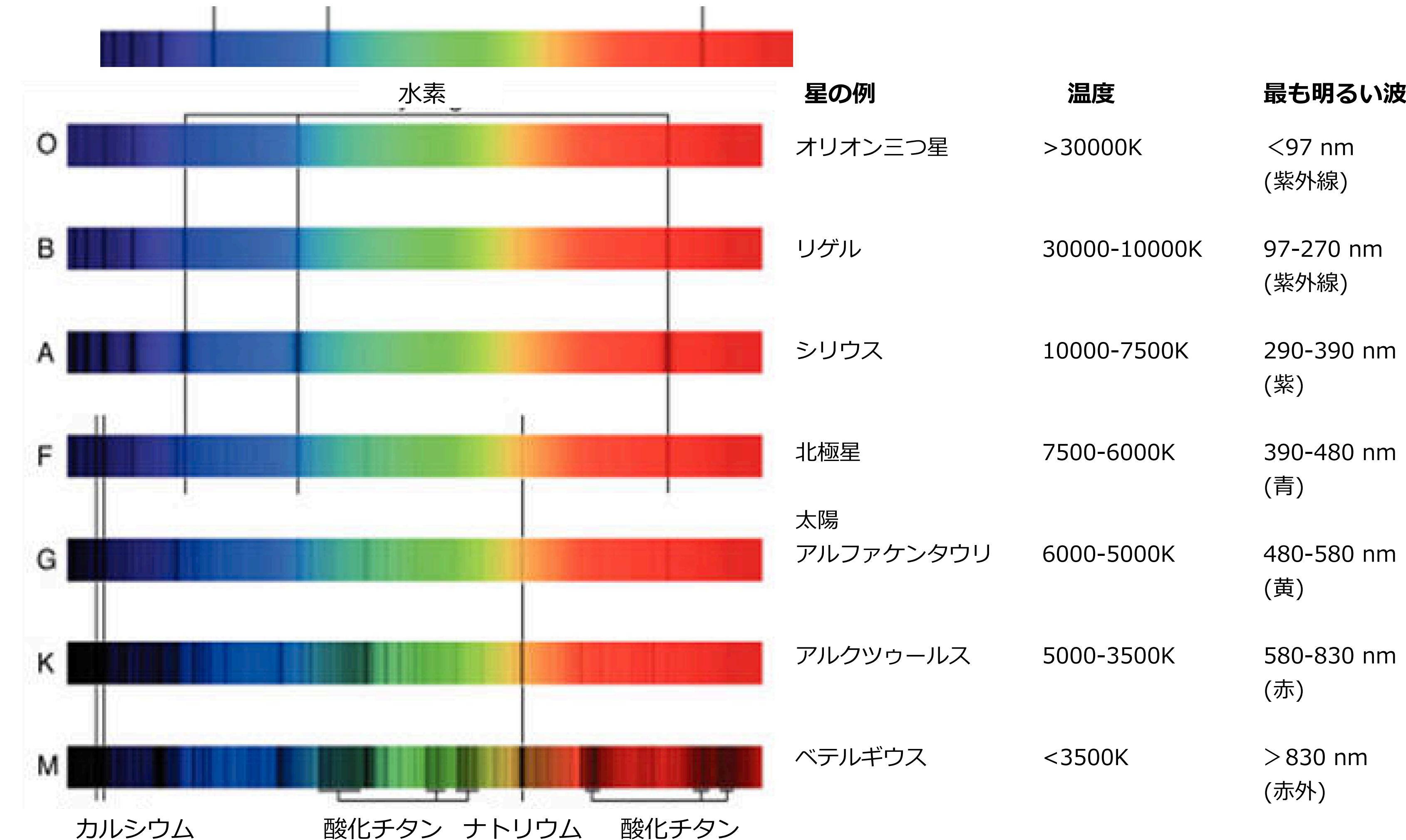
太陽光のスペクトルに暗線(吸収線)がみられる理由は何か。

# 星のスペクトル型 OBAFGKM

## 問題

遠方の星が赤方偏移していることから宇宙膨張が発見されたが、遠方(宇宙初期)には赤い星が多い、と考えなかった理由は何か。

赤方偏移についてよく理解していない



赤方偏移を理解するのもっとも難しいところだ。

宇宙膨張はいつから始まるのでしょうか。それともずっと膨張し続けているのでしょうか。

# 前回のミニツツペーパーから

【11-2】遠方の星が赤方偏移していることから宇宙膨張が発見されたが、遠方(宇宙初期)には赤い星が多い、と考えなかった理由は何か。



遠方の星では、水素などの吸収線そのものが赤側へずれて観測されたから。  
星が赤いだけでは吸収線の位置は変わらなかったのに、赤い星がタタリでは説明できません。波長のゆがみをもつ。

遠方の光のスペクトルの暗線の全体が  
赤側にシフトしたことから、遠方の星が赤く見えるのはもともとの星の色  
が赤いのではなく、宇宙全体が膨脹している光が伸びてしまったせいだ  
からだった。

黒い線があることを把握してから  
ズレたりますてわかる、(元々青い系、黄→赤)

星を観測する時、アーティを通り何が燃えているか確認していく。  
原子による暗線が地球から見て瞬間に距離が生じる。  
赤色の方にすれてしまうことがわかつていて、赤色の星ばかりだと考へてた。

物質はその温度に応じて特徴的なスペクトル線のずれとして観測されたから。  
電磁波を出しきり、スペクトルの一部に暗線が生じる。  
その暗線が赤くなるためにズレてしまい、赤方偏移してしまったため。  
赤い星ばかりだとわかるから。

惑星を星のスペクトル型で水素の黒い線が  
どこにあるかで色を区別しているため、  
遠方の星が元の色と違うことが把握できるから。

元の星が何で燃えていたか、水素の黒い線を確認していたから。



宇宙膨張のせいで光が伸びて見えづから。

星そのものが赤いという意味ではなく、  
光が伸びられて赤く見えるだけだから。

赤方偏移は、星そのものの色ではなく、光だ。  
宇宙膨張で引き伸ばされて結果だから。

星が赤いのではなく、宇宙膨張で  
光の波長が伸びて赤く見えるだけだから。

スペクトルの黒い線が赤い方によるので、元々  
の〇〇の色の星が離れて、赤い星に見えると考え  
から。

それの大誤り  
どれくらい遠ざかってかかるのか知らない。

星そのものが赤いのでではなく、星の光の線が  
全部そろって赤側にずれなくていいから。

初期の星は巨大で高温、つまり青白い星が多いと  
考えられたから。

星そのものが赤いのではなく、  
光が伸びて赤く見えるだけだから。



何が燃えている星なのか  
分かる方法があつたから。

赤方偏移は星の色そのものではない  
星の色は温度で決まるため。

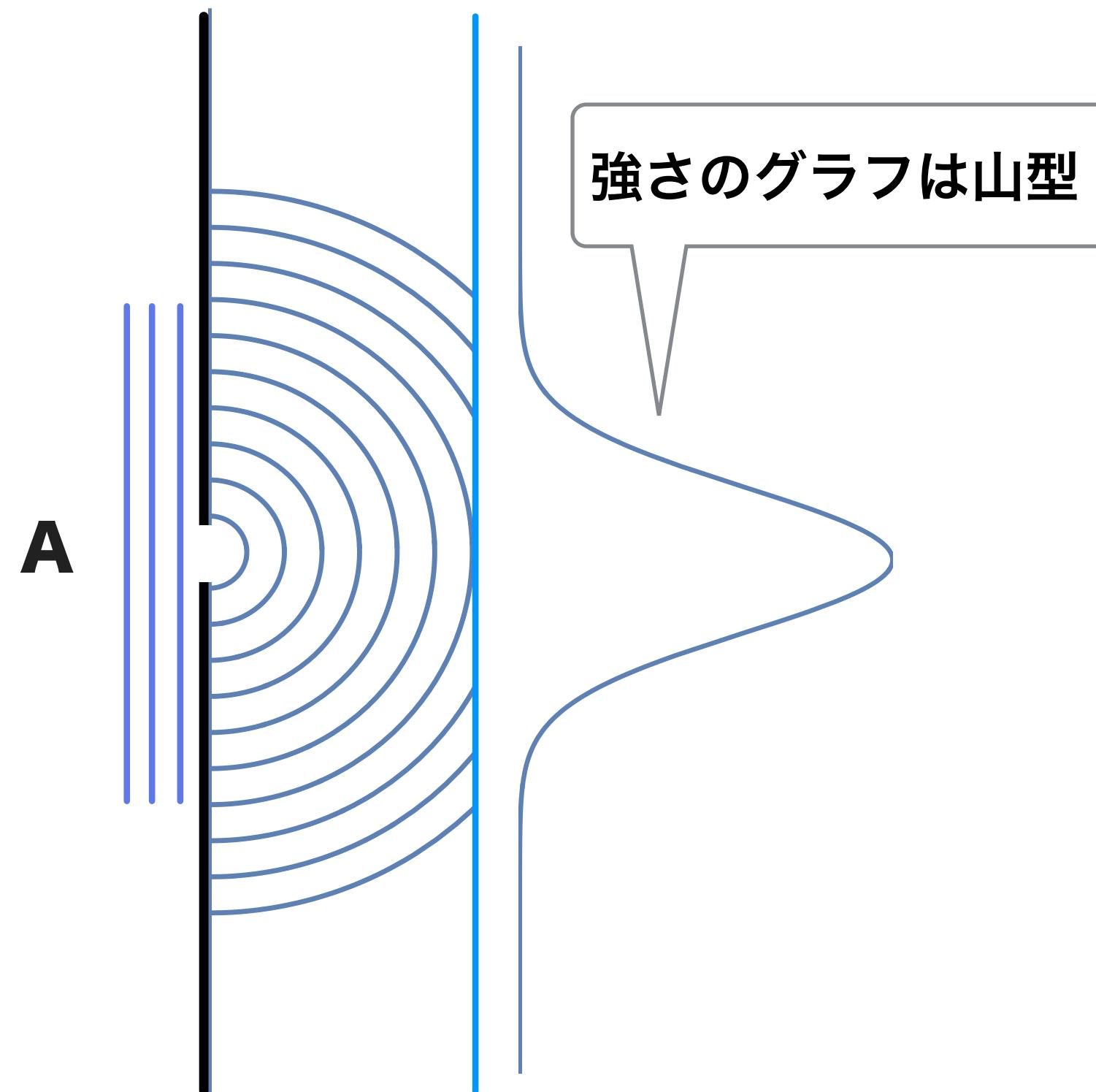
比名

14

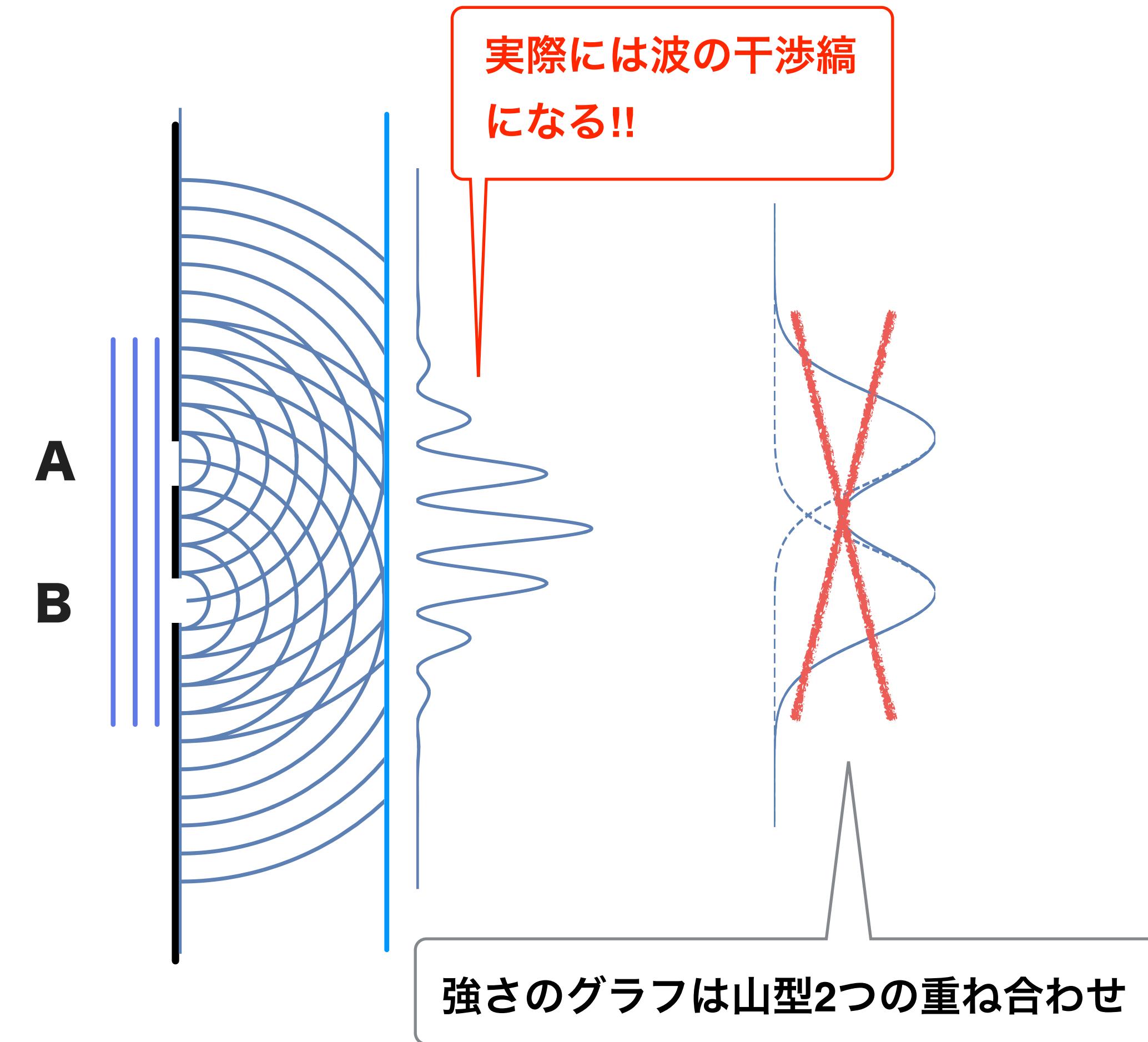
# 2重スリット実験

教科書 p141

单スリットの場合



2重スリットの場合



粒子だと考えると、A/Bどちらを通ったかが明らかになるので、干渉縞は生じないはず。

# 量子力学の考え方



ボルン

量子力学の式は「粒子の存在確率」を与える。



ボーア

A/Bどちらを通ったかは確率でしかわからない。

## 確率解釈

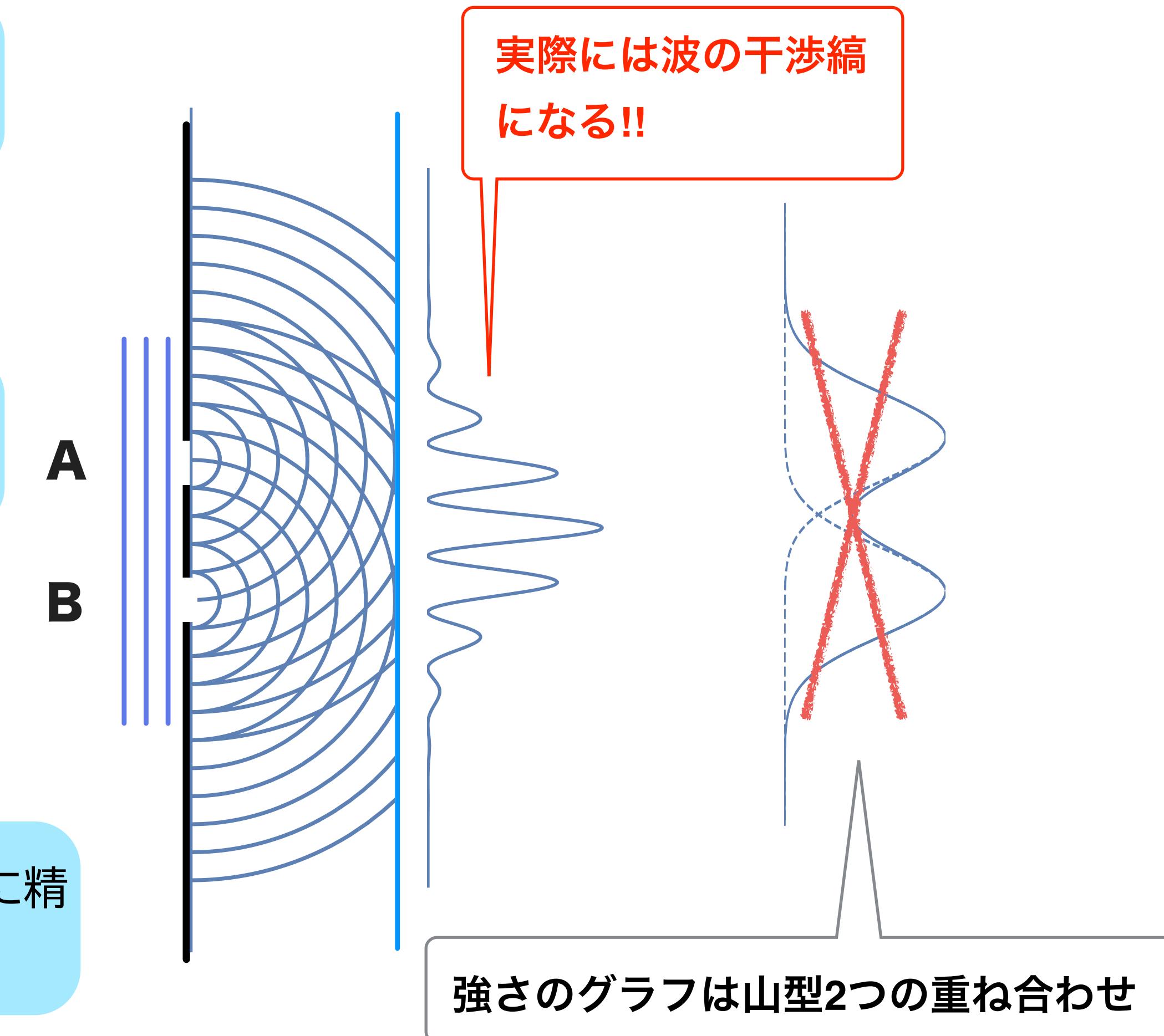


ハイゼンベルグ

粒子の位置と運動量は、同時に精度よく決められない。

## 不確定性原理

## 2重スリットの場合



粒子だと考えると、A/Bどちらを通ったかが明らかになるので、干渉縞は生じないはず。

# 粒子性と波動性

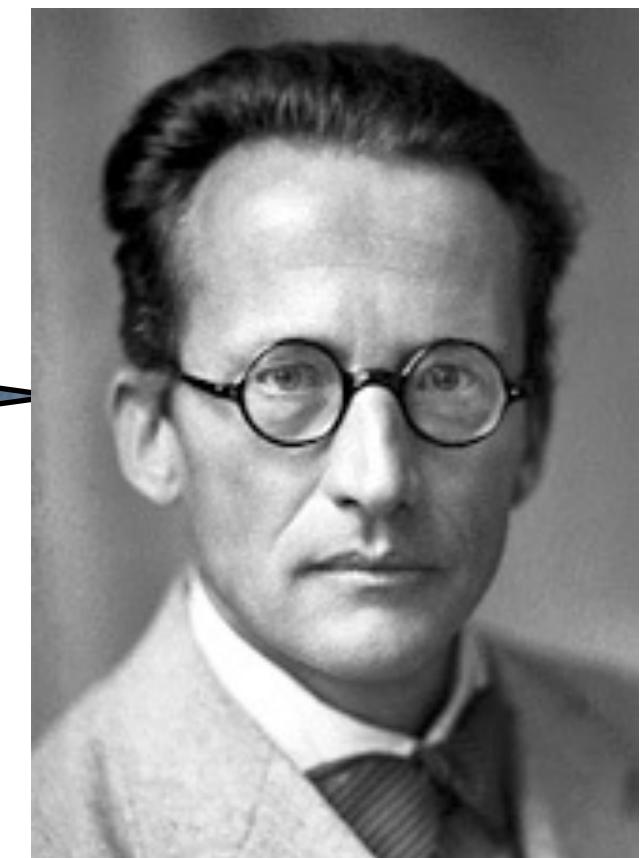
- 原子の構造から、光も物質も  
「波の性質も、粒子の性質も両方有する」と考える
- 2重スリットの実験  
光や電子が波であることの実証。粒子性に矛盾
  - 波動関数、確率解釈
- 粒子では位置や運動量が決まるはず  
波では 位置や運動量が決まらない
  - 不確定性原理「両方同時に測定できない」と考えざるを得ない
  - 観測問題 → 物理的実在とは何か

## 4.4.4

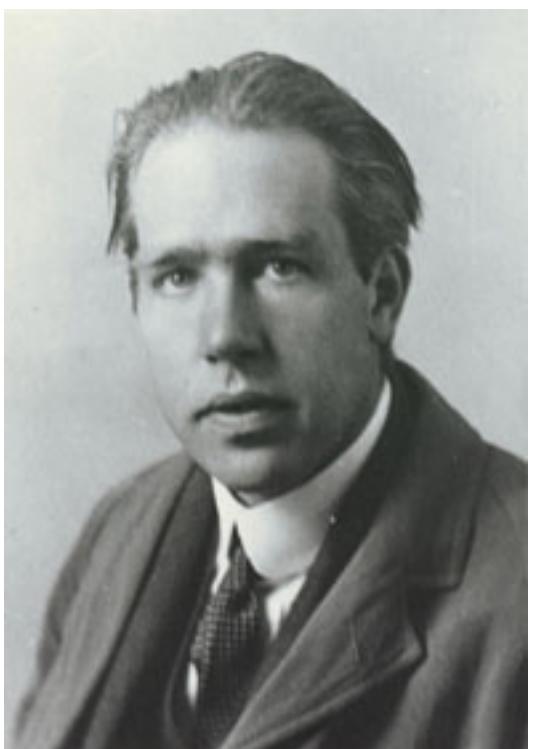
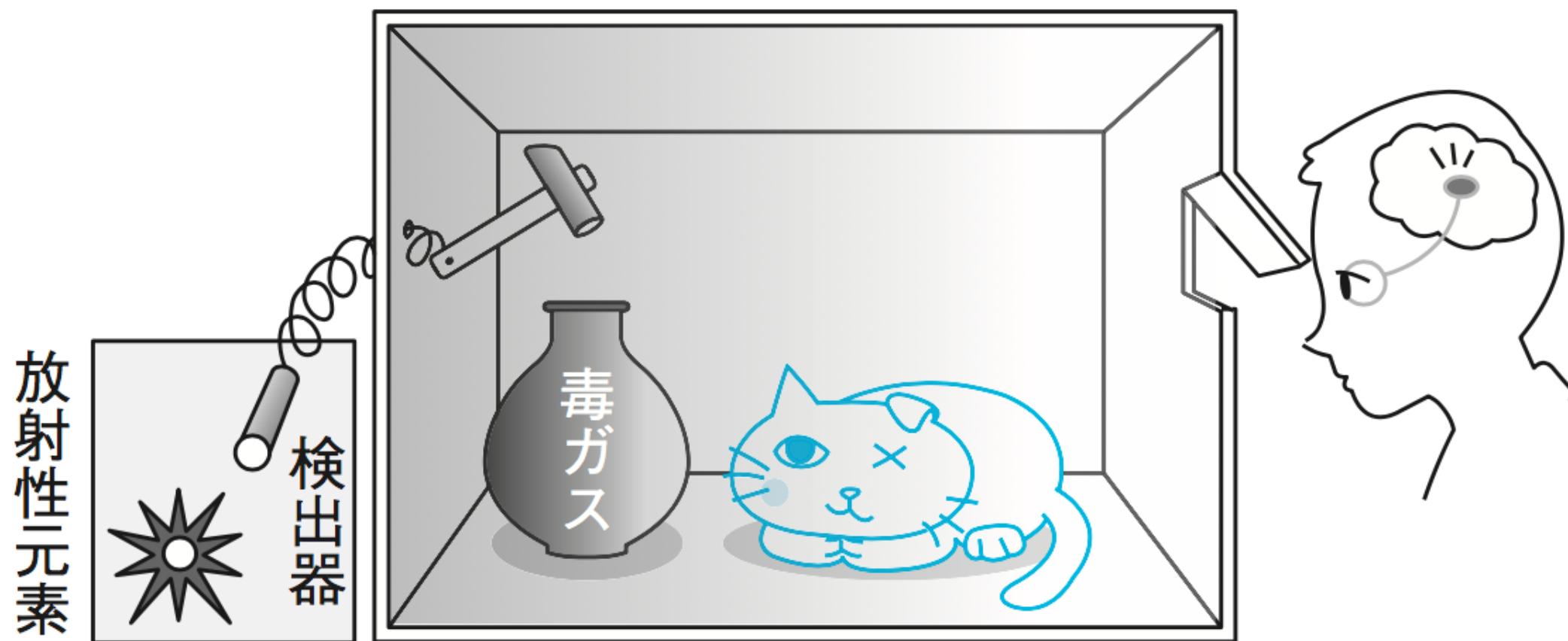
## シュレーディンガーの猫

確率と考えるなら、パラドクスを提案する。

確率的に毒ガスが出るとする。しかし、猫は生きているのか、死んでいるのかどちらかだ。矛盾では？



Schrödinger



Bohr

猫は「生きている状態」と「死んでいる状態」の重ね合わせである。



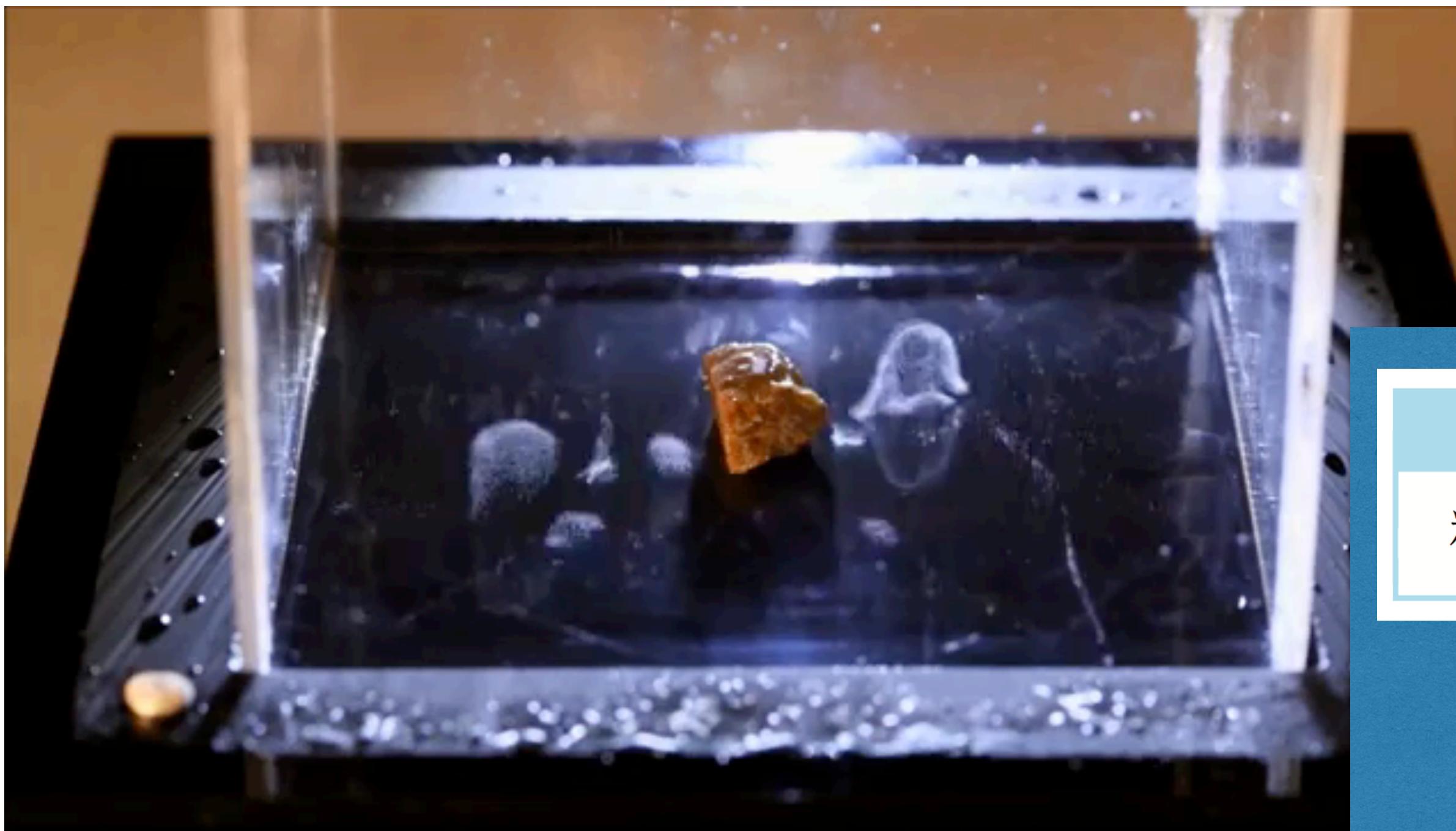
シュレーディンガーが物理学者だと言うのは知りませんでした。

## 4.4.2

## 不確定性原理

行列力学では一直線に飛んで行く電子の軌跡にはならない。

- ⇒ 電子そのものを見ているわけではない！
- ⇒ ミクロには、常にゆらいでいるのでは？
- ⇒ 電子の位置を測定するには光を照射しかし、光を照射すれば電子は動く。



霧箱実験

水蒸気でみたした容器に放射線が飛び込むと、

空気中の原子をイオン化し、そのイオンが

水蒸気を集めるために放射線の軌跡が記録される。

モナズ石による放射線の飛跡



Werner Heisenberg  
(1901-76)

### 不確定性原理

粒子の位置と運動量は、同時に値を決めるることはできない

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

位置の測定誤差 × 運動量の測定誤差 はゼロにはならない

## 4.4.2 不確定性原理

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

この式は、位置を精度よく決めようとすると ( $\Delta x \rightarrow 0$  とすると) 運動量の幅が無限大になって定まらず、逆に運動量を精度よく決めようとすると ( $\Delta p \rightarrow 0$  とすると) 位置が定まらないことを意味する。つまり、

### 不確定性原理

粒子の位置と運動量は、同時に値を決めるすることはできない

とも解釈できる。私たちは、位置と運動量の知り得る精度に限界があり、不確定性関係で限られた範囲でしか知り得ないことになる。しかし、この性質は、物理法則としては奇妙な印象を与える。位置を「精密に決めようとすると」運動量がわからなくなる、あるいは逆に運動量を「精密に決めようとすると」位置がわからなくなる、という文脈では「…」の部分に観測しようとする人間が介在しているようだ。

これまですべての物理法則には、人間の意志や主觀に入る余地はなく、だからこそ客觀的な議論ができてきた。もし誤差が生じるのであれば、それは人間の観測・計測が引き起こす測定誤差であり、原理的なものではない。にもかかわらず、量子力学に存在する不確定性関係は、原理的なものであるという。どんなに計測技術を向上させても、位置と運動量を正確に知ることができないという。はたしてそのような粒子は客觀的な物理対象といえるのかどうか。

量子力学をめぐる認識論および原理的な解釈に関する論争は、この点から始まった。

# 前回のミニツツペーパーから

式が増えて、論理も多く出てくるので頭がパンクしきりになります。  
放射線が可視化されても、そのものが見えているわけではないと  
いう事実にハッとした。

4. 現代物理2:原子・素粒子の理論(量子論)》4.4 確率解釈と不確定性原理

教科書 p137

## 4.4.2 不確定性原理

行列力学では一直線に飛んで行く電子の軌跡にはならない。

- ⇒ 電子そのものを見ているわけではない！ ⇒ 電子の位置を測定するには光を照射しかし、光を照射すれば電子は動く。
- ⇒ ミクロには、常にゆらいでいるのでは？



霧箱実験  
モナズ石による放射線の飛跡  
水蒸気でみたした容器に放射線が飛び込むと、  
空気中の原子をイオン化し、そのイオンが  
水蒸気を集めるために放射線の軌跡が記録される。

<https://www.youtube.com/watch?v=fAmXxyBUGwA>



Werner Heisenberg  
(1901-76)

### 不確定性原理

粒子の位置と運動量は、同時に値を決めるすることはできない

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

位置の測定誤差 × 運動量の測定誤差 はゼロにはならない

46

4. 現代物理2:原子・素粒子の理論(量子論)》4.4 確率解釈と不確定性原理

教科書 p138

## 4.4.2 不確定性原理

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

この式は、位置を精度よく決めようとすると ( $\Delta x \rightarrow 0$  とすると) 運動量の幅が無限大になって定まらず、逆に運動量を精度よく決めようと ( $\Delta p \rightarrow 0$  とすると) 位置が定まらないことを意味する。つまり、

### 不確定性原理

粒子の位置と運動量は、同時に値を決めるすることはできない

とも解釈できる。私たちは、位置と運動量の知り得る精度に限界があり、不確定性関係で限られた範囲でしか知り得ないことになる。しかし、この性質は、物理法則としては奇妙な印象を与える。位置を「精密に決めようとすると」運動量がわからなくなる、あるいは逆に運動量を「精密に決めようとすると」位置がわからなくなる、という文脈では「…」の部分に観測しようとする人間が介在しているようだ。

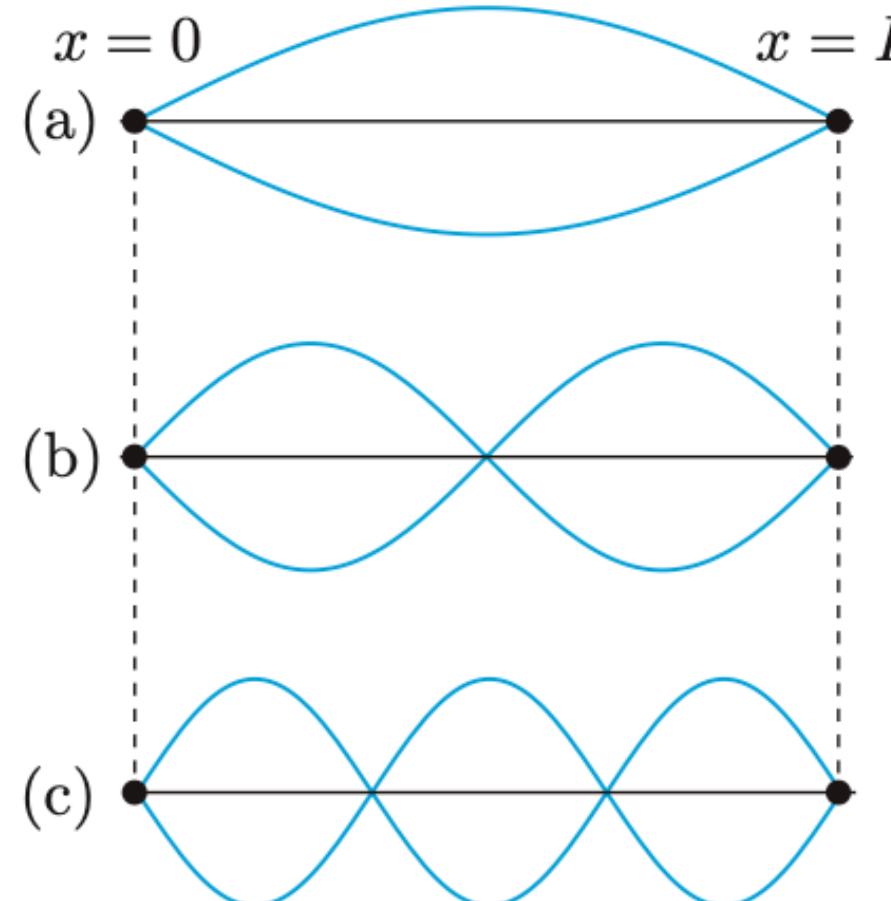
これまですべての物理法則には、人間の意志や主觀が入る余地はなく、だからこそ客観的な議論ができた。もし誤差が生じるのであれば、それは人間の観測・計測が引き起こす測定誤差であり、原理的なものではない。にもかかわらず、量子力学に存在する不確定性関係は、原理的なものであるという。どんなに計測技術を向上させても、位置と運動量を正確に知ることができないという。はたしてそのような粒子は客観的な物理対象といえるのかどうか。

量子力学をめぐる認識論および原理的な解釈に関する論争は、この点から始まった。

# 不確定性原理の導出

$$\text{光のエネルギー} \quad E = h\nu$$

$$\text{光の運動量} \quad p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$



**図 4.26** 両端を固定すれば存在できる波長は決まる。上図で両端の長さを  $L$  とすれば、波長の最大値は  $\lambda = 2L$  となる。

## ◆ Advanced 不確定性関係の簡単な導出

長さ  $L$  の箱に閉じ込められた光の最低エネルギー状態では、粒子が左右に進むときの運動量は  $p = \pm h/2L$  となるので、平均値  $\langle p \rangle$  はゼロである。だが、 $\langle p^2 \rangle = h^2/4L^2$  より、 $\Delta p \sim h/2L$  となる（運動量の不確定性）。一方、波動としての粒子はどこにいるのか特定できず、箱の長さ  $L$  程度の大きさに広がっている。図 4.26(a) のような広がりとすれば、 $\langle x \rangle = L/2$ 、 $\langle x^2 \rangle = L^2(\pi^2 - 4)/2\pi^2$  より、 $\Delta x \sim L/2\pi$  となる（位置の不確定性）。2つの式より、

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \quad (4.20)$$

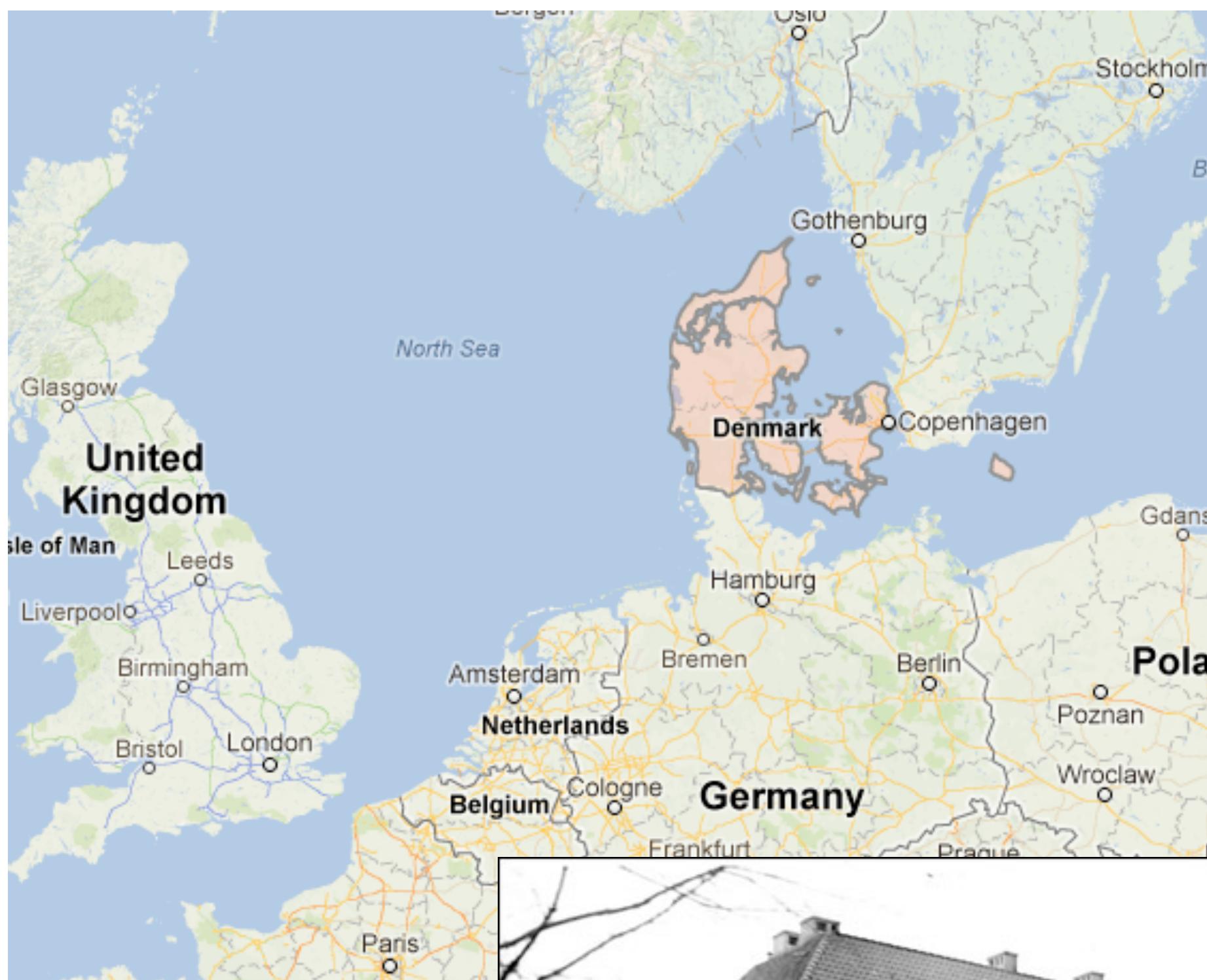
となる。（プランク定数  $h$  がゼロになるようなニュートン物理学の極限では、位置も運動量も明確に決められる。）

$$\Delta p = \sqrt{\langle p^2 \rangle - \langle p \rangle^2} \sim h/2L$$

$$\Delta x = \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} \sim L/2\pi$$

## 4.4.3

## コペンハーゲン解釈



1922



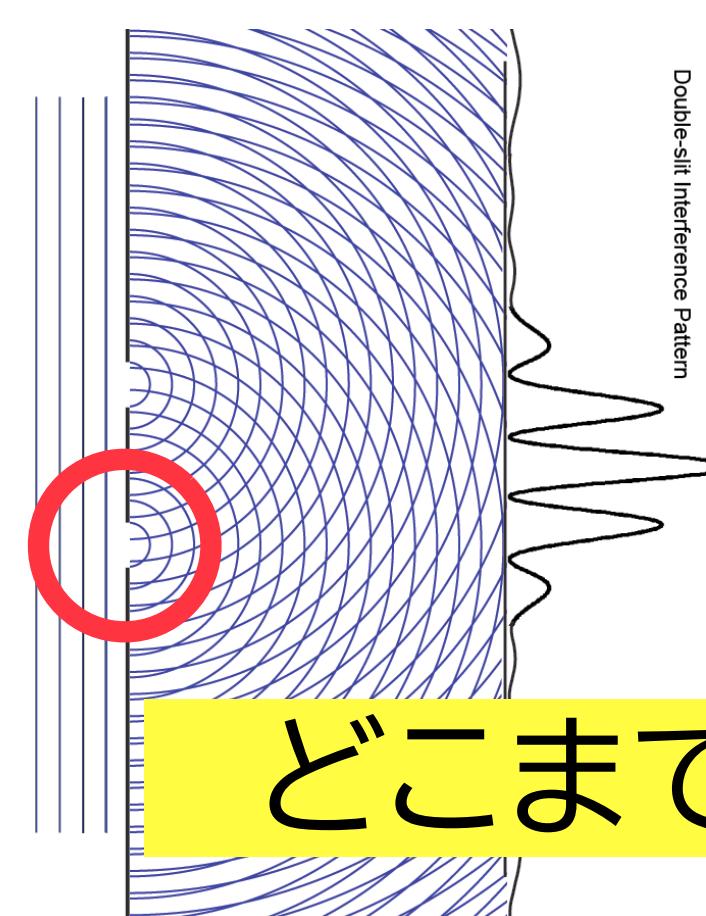
1962



Niels Bohr Institute  
Copenhagen, Denmark

# 2重スリット通過の Yes/No 判定問題

原子核レベルのミクロの世界



量子物理

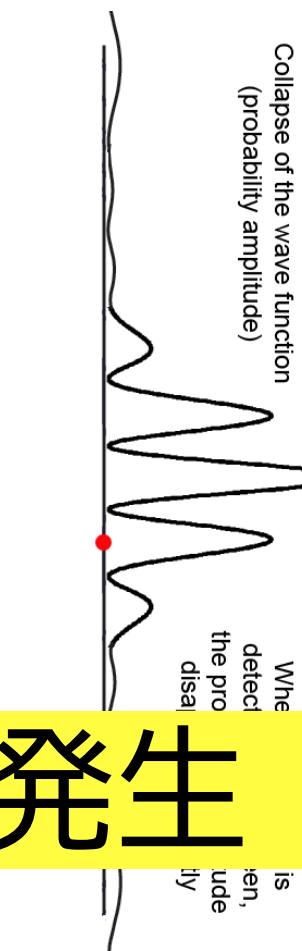
どこまでが物理的な実体か？「観測問題」発生

人間が測定するマクロの世界



波束の収縮

古典物理



片方のスリットに検出器を設置

粒子が通過したことがわかる → → 波ではなくなる.

粒子が通過しなかったことがわかる → → 波ではなくなる.

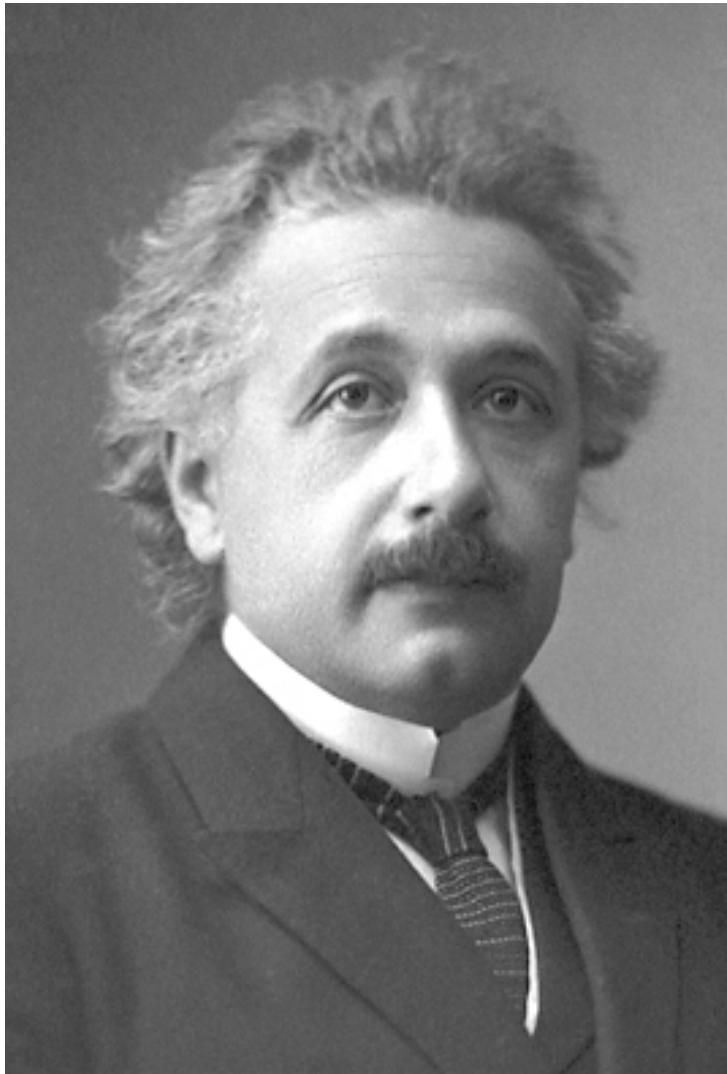
「測定すること」自体が波束の収縮を引き起こすのだ。



Bohr

# アインシュタイン と ボーア

Albert Einstein



1927年時 48歳

孤高のスーパースター

1921年ノーベル物理学賞  
「光電効果の解明」

Niels Bohr



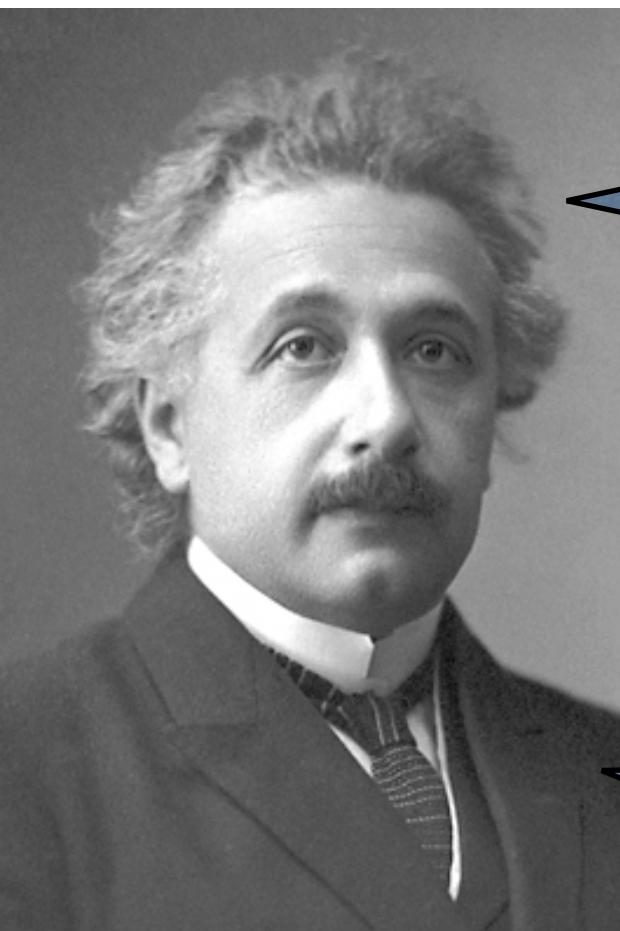
1927年時 45歳

原子物理学のゴッドファーザー

1922年ノーベル物理学賞  
「原子構造の解明」

# ainshutain・ボーア論争 まとめ (1)

ainshutain



光がどちらかのスリットを通過したのか,  
は測定できるはずだ.

確率でしか測定できない.  
波動関数は確率を表すのだ.

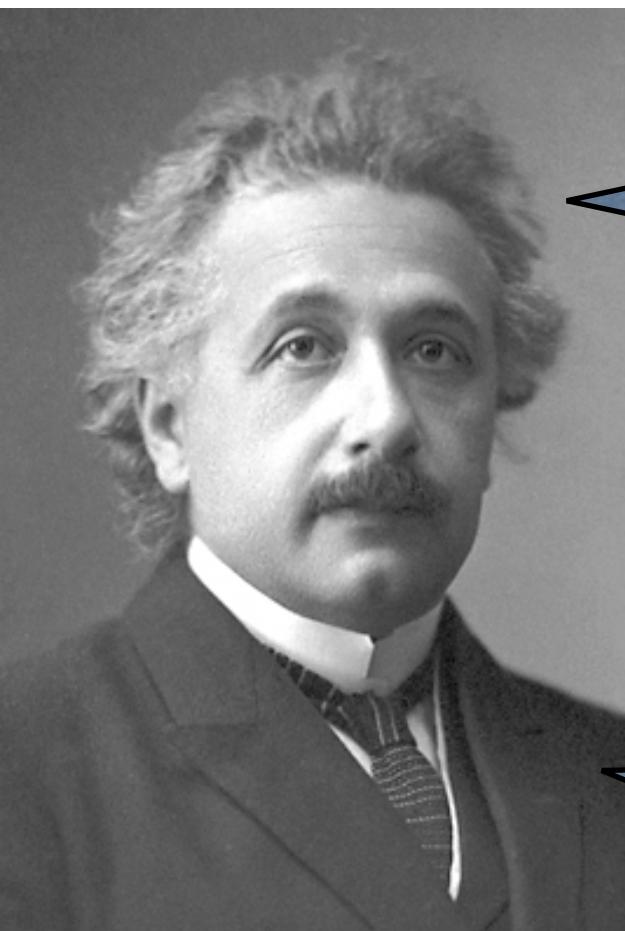
神はサイコロを振ったりしない.

ボーア  
(コペンハーゲン解釈)



# ainシュタイン・ボーア論争 まとめ (2)

ainシュタイン

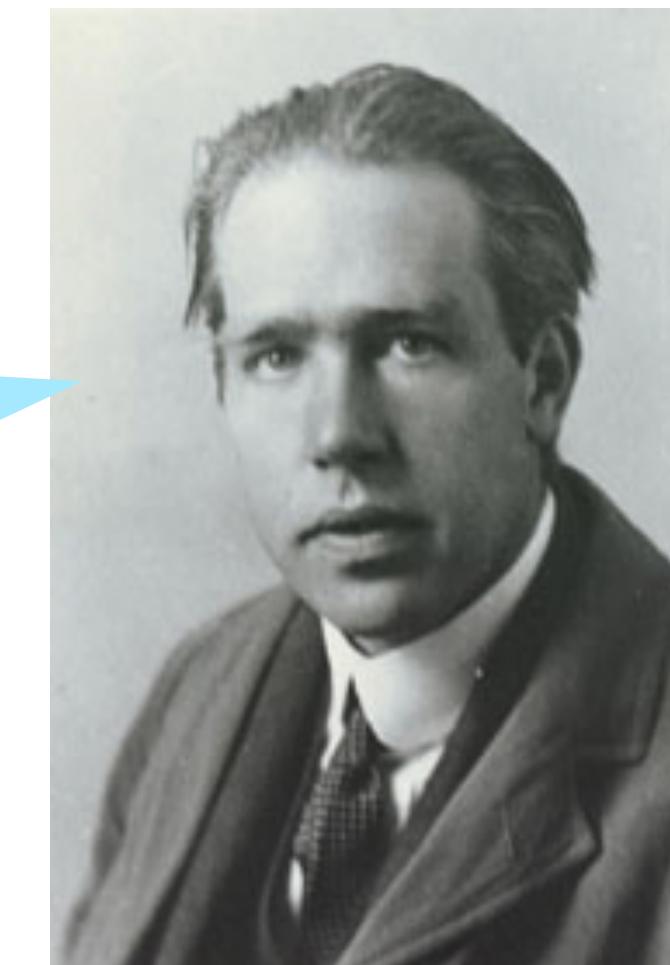


光がどちらかのスリットを通過したのか,  
は測定できるはずだ.

確率でしか測定できない.  
波動関数は確率を表すのだ.

神はサイコロを振ったりしない.

ボーア  
(コペンハーゲン解釈)

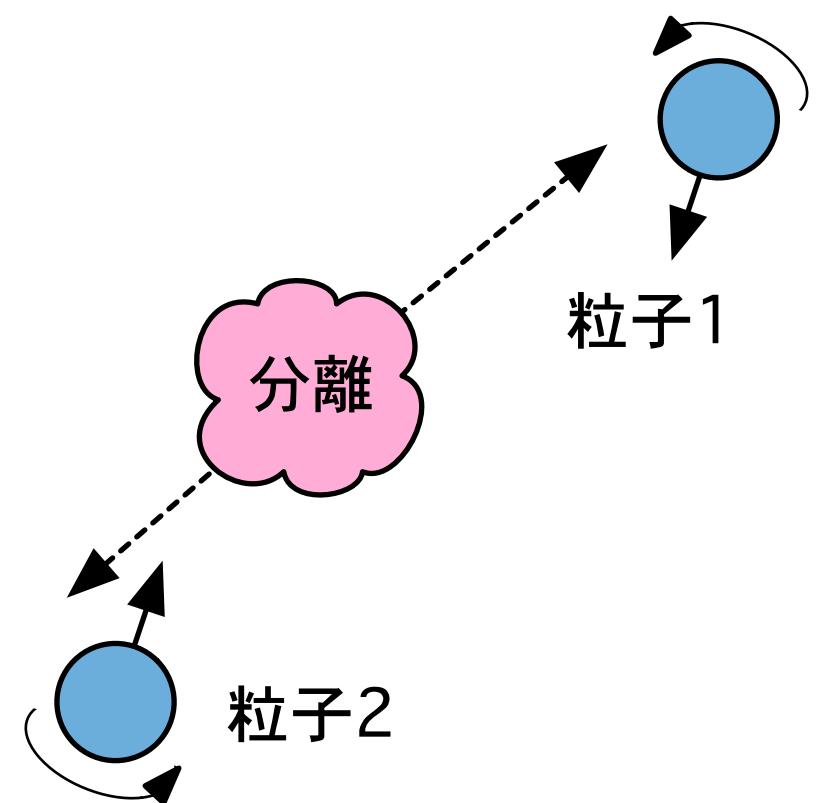


EPRパラドックスを提案

不確定性原理を認める量子力学は誤っている

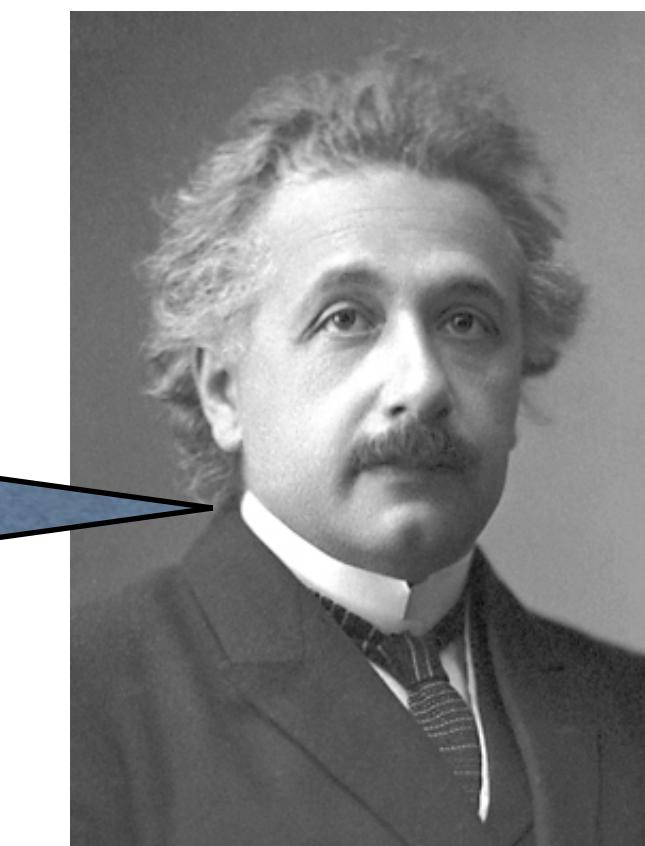
## 量子力学の不完全性を突く反論

## EPRパラドクス



我々は他方を乱すことなく測定ができる。

だから、はじめから系は「物理的な実在」を持つており、測定する以前から位置や運動量は確定していた、といえる。これらを不確定とする量子力学は不完全だ。



MAY 15, 1935      PHYSICAL REVIEW      VOLUME 47

**Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?**

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*  
(Received March 25, 1935)

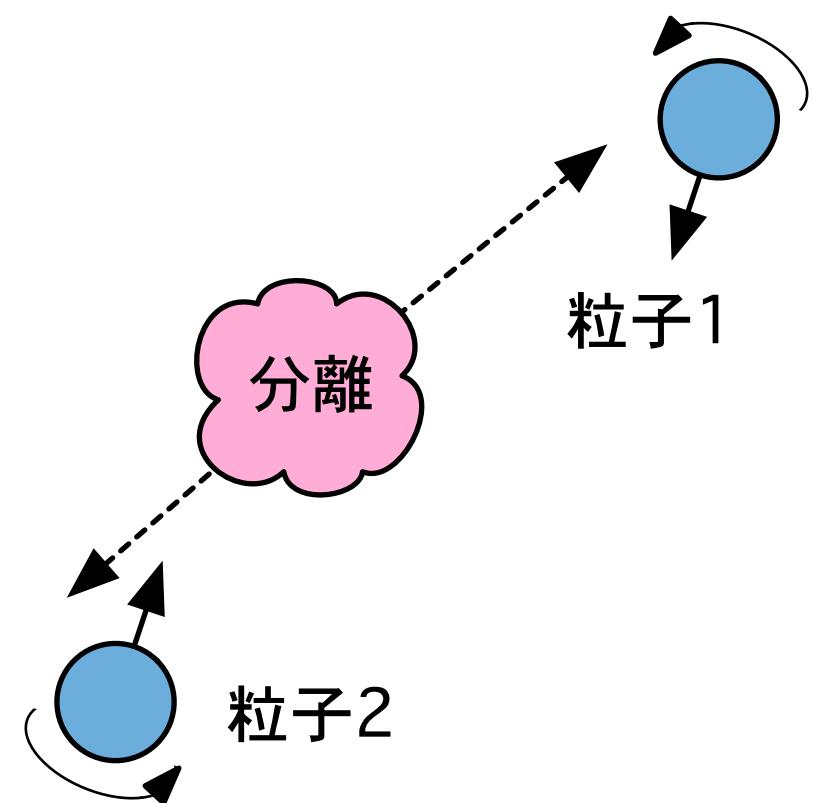
In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

Phys. Rev. 47 (1935) 777-780

1935年EPR論文

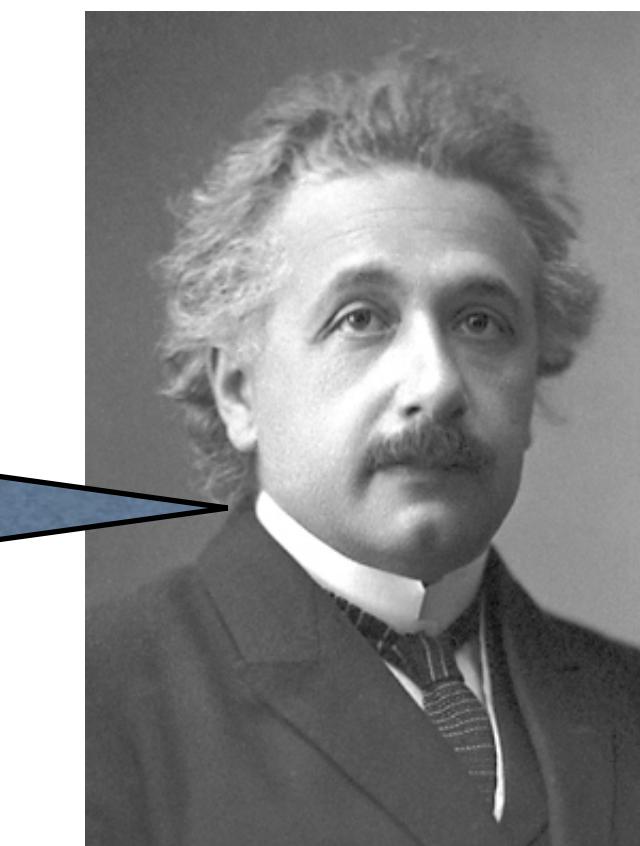
## 量子力学の不完全性を突く反論

## EPRパラドクス



我々は他方を乱すことなく測定ができる。

だから、はじめから系は「物理的な実在」を持つており、測定する以前から位置や運動量は確定していた、といえる。これらを不確定とする量子力学は不完全だ。



「完全性」ではなく、「相補性」という考え方で理解しよう。

Phys. Rev. 48 (1935)  
696-702

OCTOBER 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 48

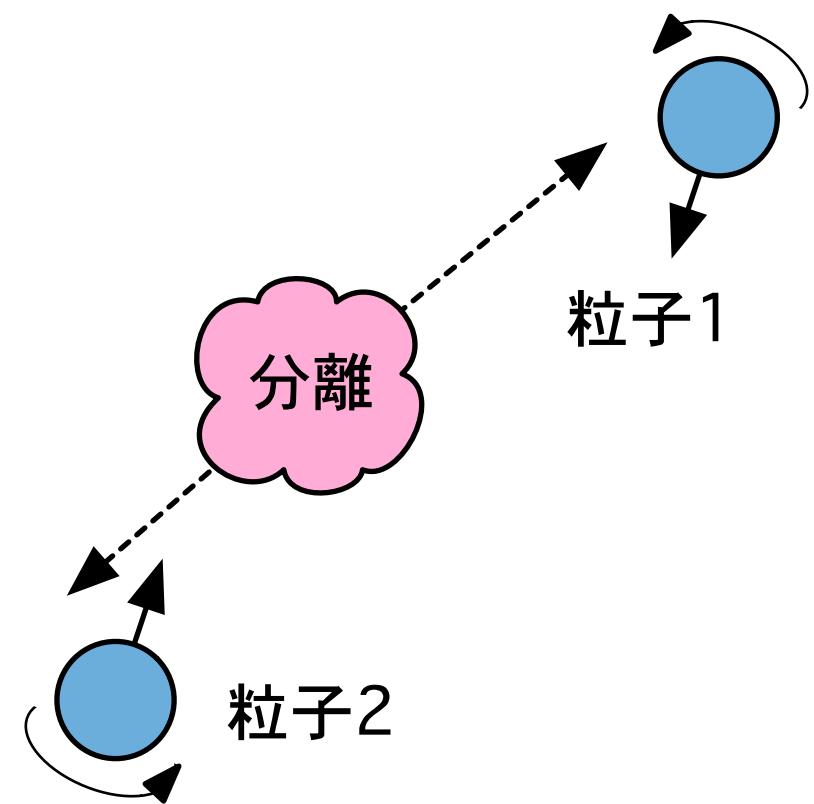
## Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?

N. BOHR, *Institute for Theoretical Physics, University, Copenhagen*  
(Received July 13, 1935)

It is shown that a certain "criterion of physical reality" formulated in a recent article with the above title by A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen contains an essential ambiguity when it is applied to quantum phenomena. In this connection a viewpoint termed "complementarity" is explained from which quantum-mechanical description of physical phenomena would seem to fulfill, within its scope, all rational demands of completeness.

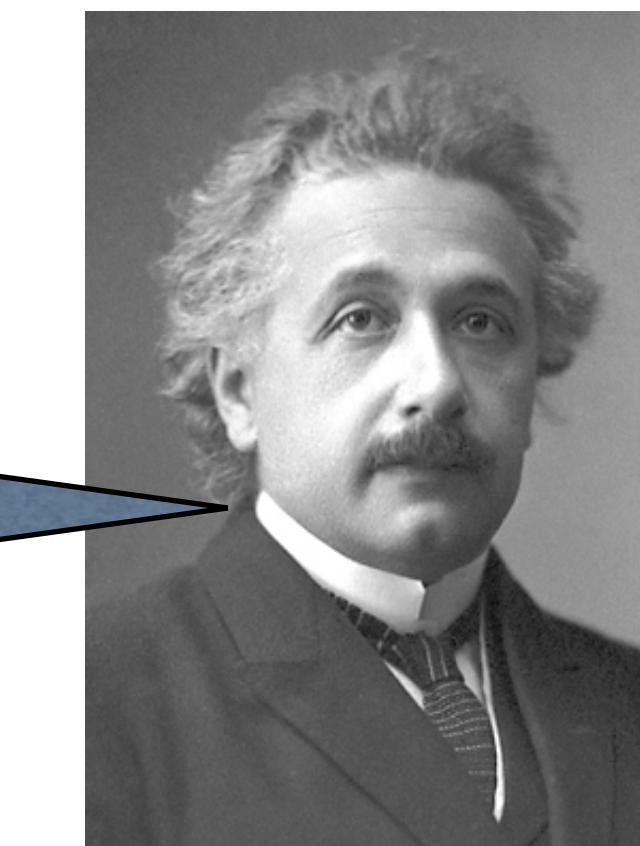
## 量子力学の不完全性を突く反論

## EPRパラドクス



我々は他方を乱すことなく測定ができる。

だから、はじめから系は「物理的な実在」を持つており、測定する以前から位置や運動量は確定していた、といえる。これらを不確定とする量子力学は不完全だ。



物理的実在が存在し、我々はそれを観測する

physical reality



「完全性」ではなく、「相補性」という考え方で理解しよう。

completeness

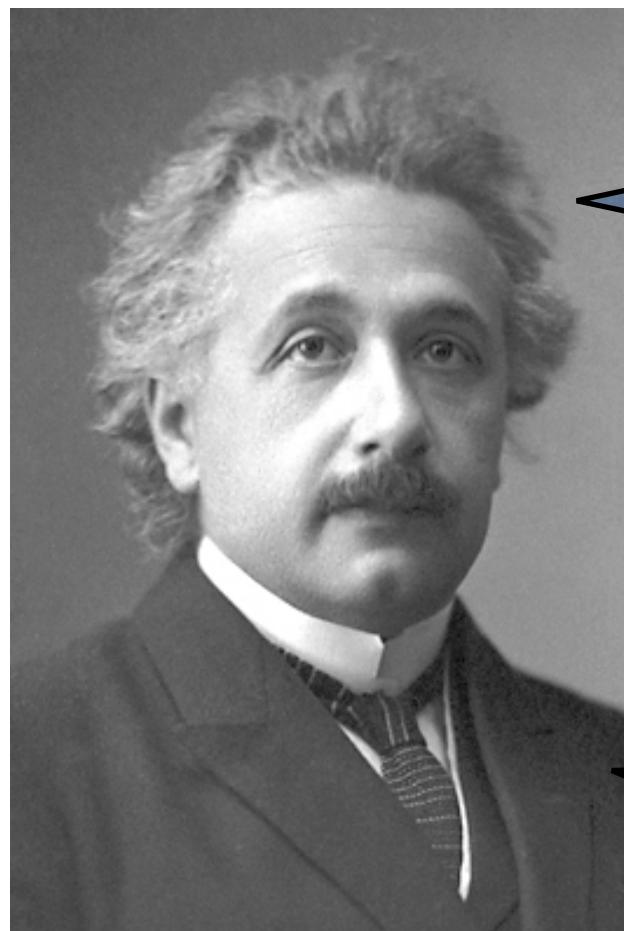
complementarity

実在は重要ではなく、観測する現象を説明するのが物理学

physical description

# AINSHU TAIN・BOA RONSHU まとめ (3)

AINSHU TAIN



1955年没(76歳)

光がどちらかのスリットを通過したのか,  
は測定できるはずだ.

確率でしか測定できない.  
波動関数は確率を表すのだ.

神はサイコロを振ったりしない.

EPRパラドックスを提案

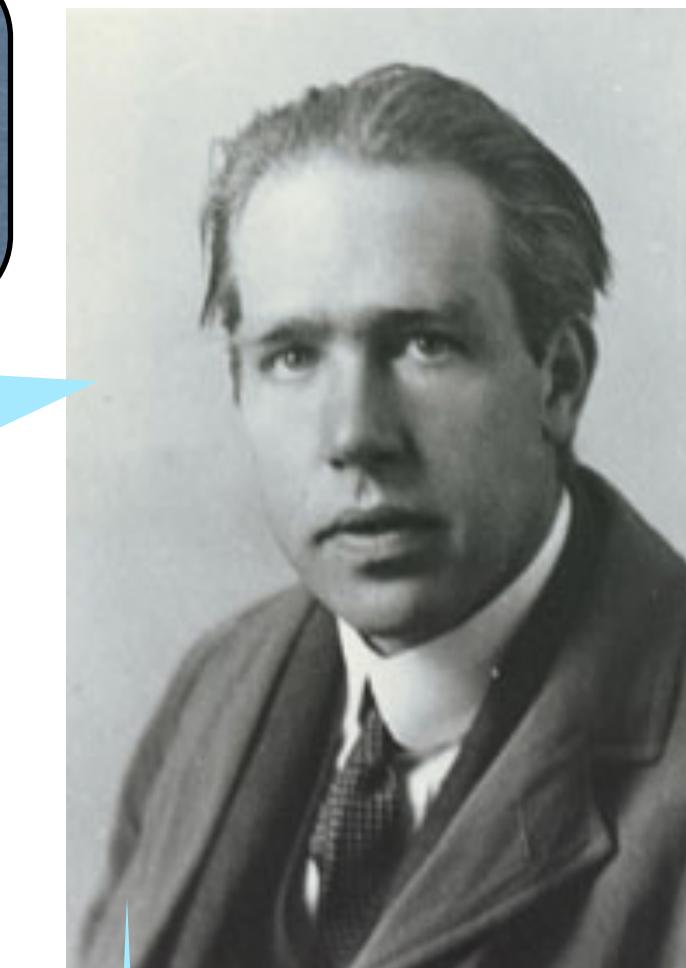
不確定性原理を認める量子力学は誤っている

物理的実在が存在し, 我々はそれを観測する

実在は重要ではなく, 観測する現象を説明するのが物理学

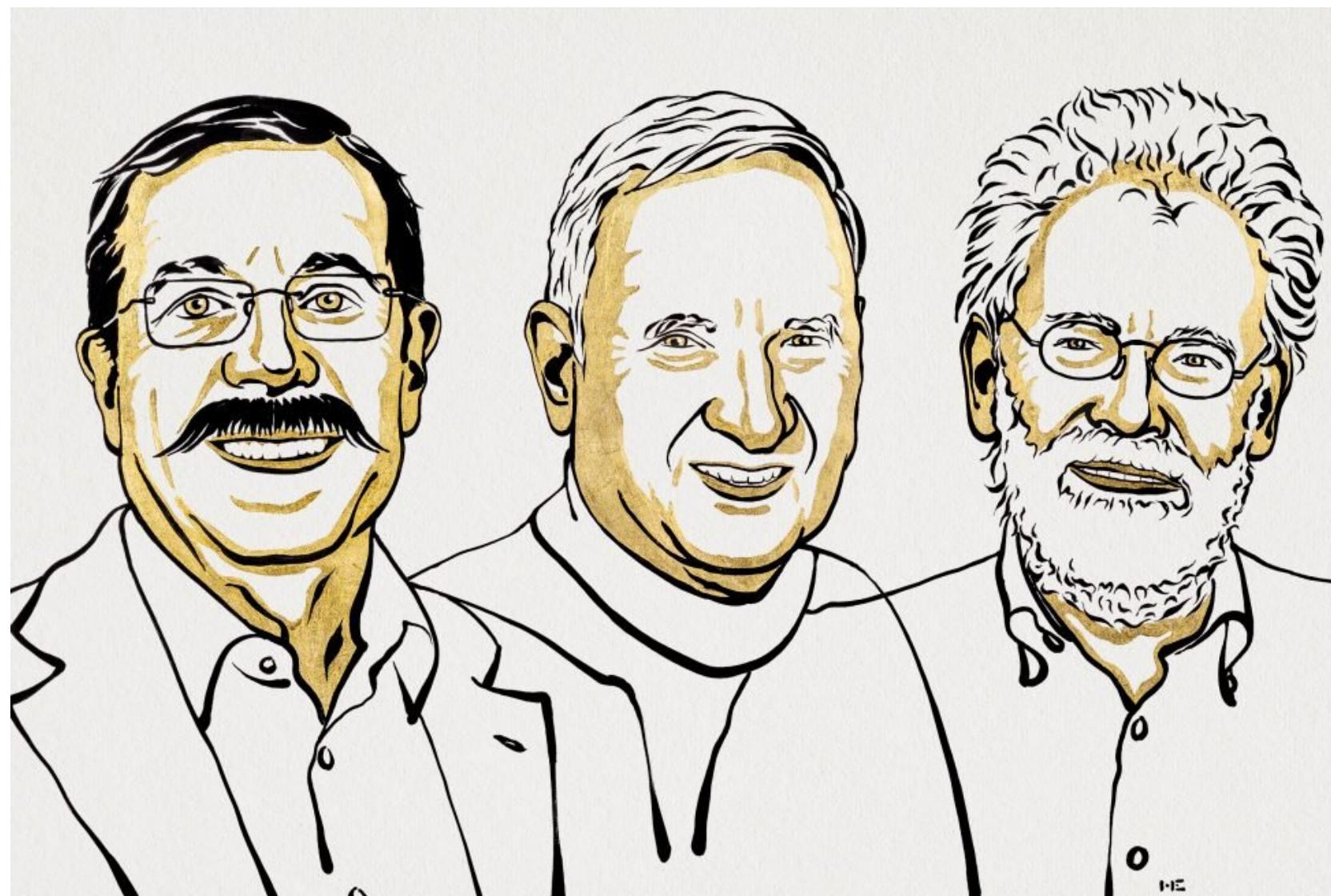
ベルの不等式の破れが確認され, こちらが正しい

BOA  
(コペンハーゲン解釈)



1962年没(77歳)

“量子もつれの実験, Bell不等式の破れの確認による量子情報科学の創始”  
量子もつれ(エンタングルメント, entanglement)



Alain Aspect

Université Paris-Saclay and  
École Polytechnique, Palaiseau, France

John F. Clauser

J.F. Clauser & Assoc.,  
Walnut Creek, CA, USA

Anton Zeilinger

University of Vienna, Austria

アラン・アスペ(75)仏パリ・サクレー大

ジョン・クラウザー(79)米 クラウザーアソシエイツ社

アントン・ツァイリンガー(77) オーストリア・ウィーン大

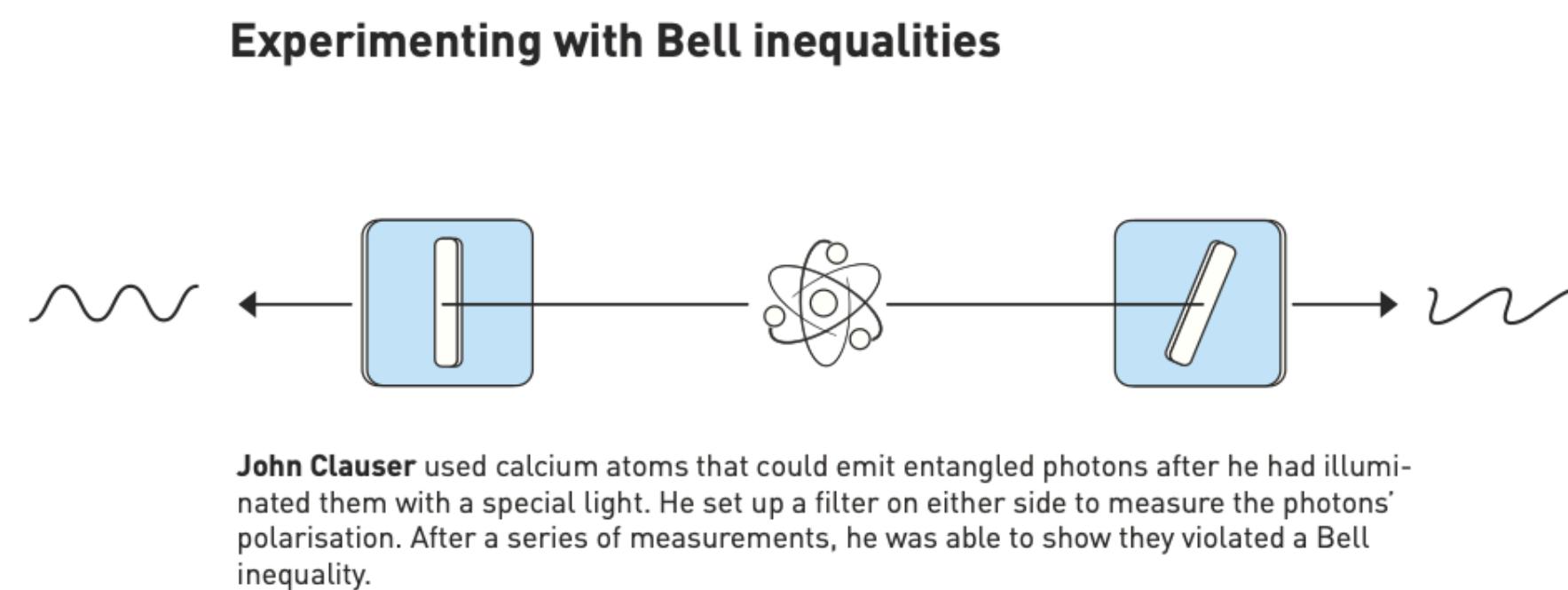
The Nobel Prize in Physics 2022 was awarded to [Alain Aspect](#), [John F. Clauser](#) and [Anton Zeilinger](#) “for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science”.

Their results have cleared the way for new technology based upon quantum information.

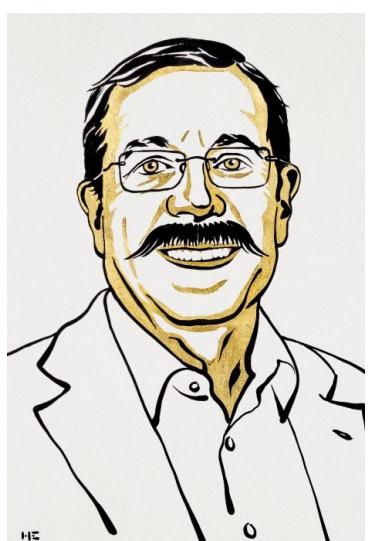
# ベルの不等式は破れている！(量子論の考えが正しい)



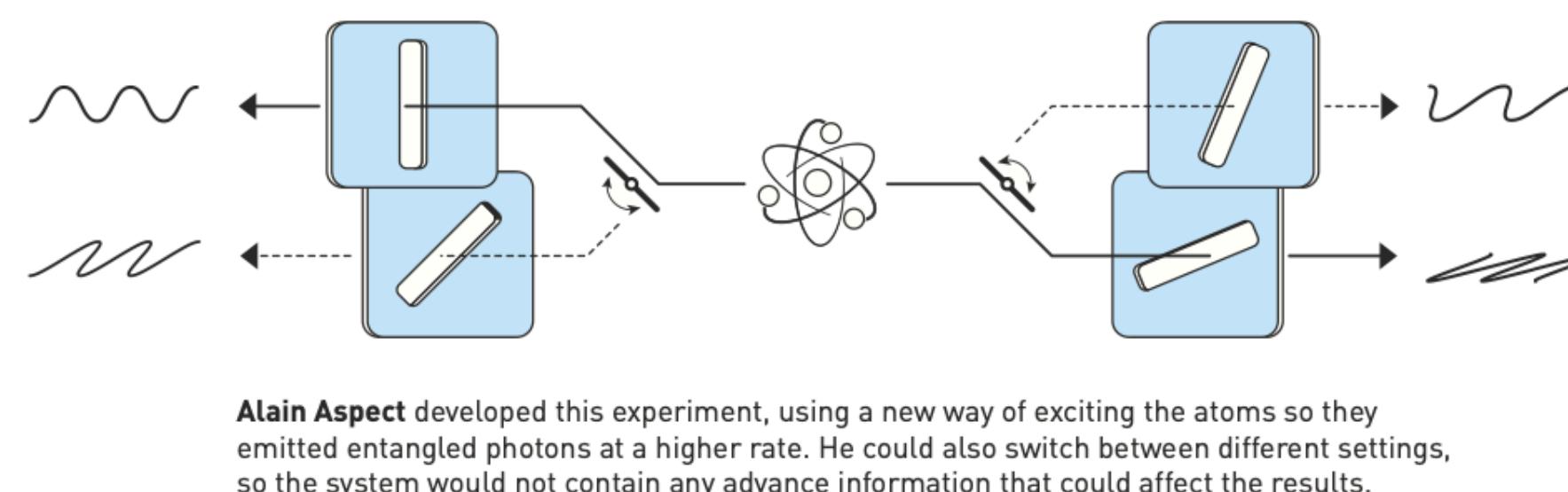
1969

ジョン・クラウザー  
米

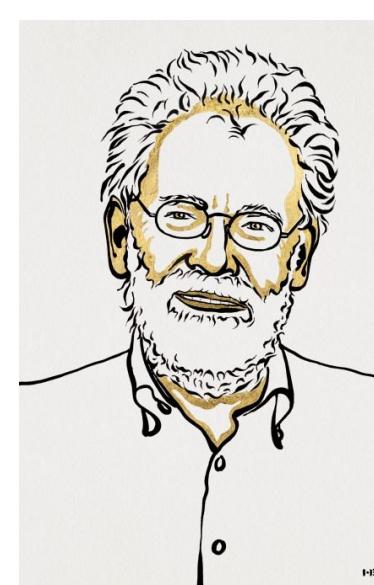
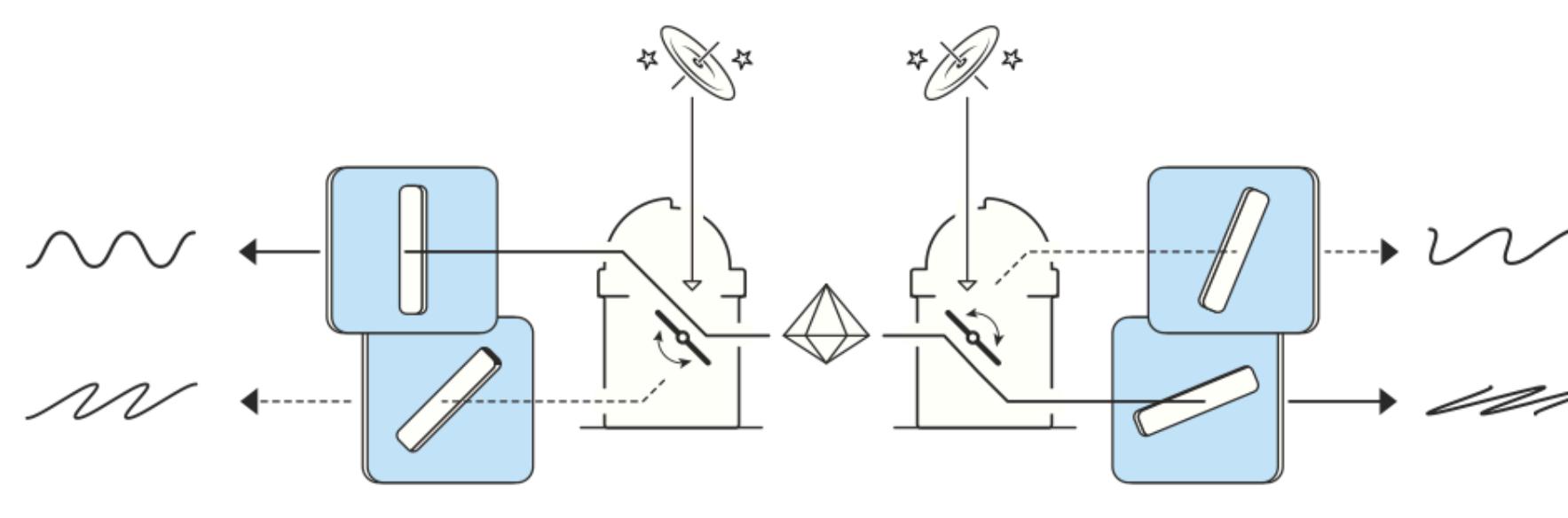
カルシウム原子から放射される量子もつれの光子の偏光状態を測定。ベルの不等式が破れていることを示す。



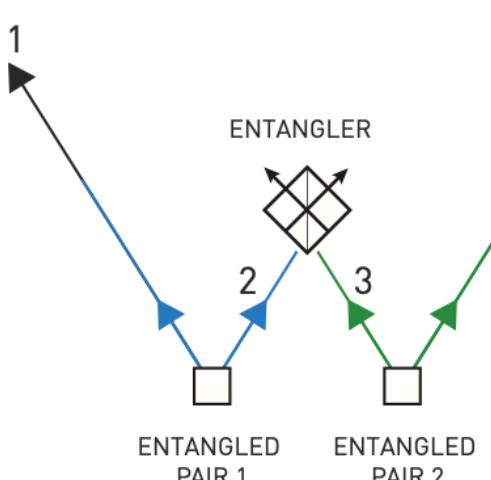
1980s

アラン・アスペ  
仏パリ・サクレー大

放射される量子もつれの光子の数を増加。さらに両端で測定する偏光状態を変更できるようにして、光子の偏光状態と実験装置の設定に関係がないことを示す。

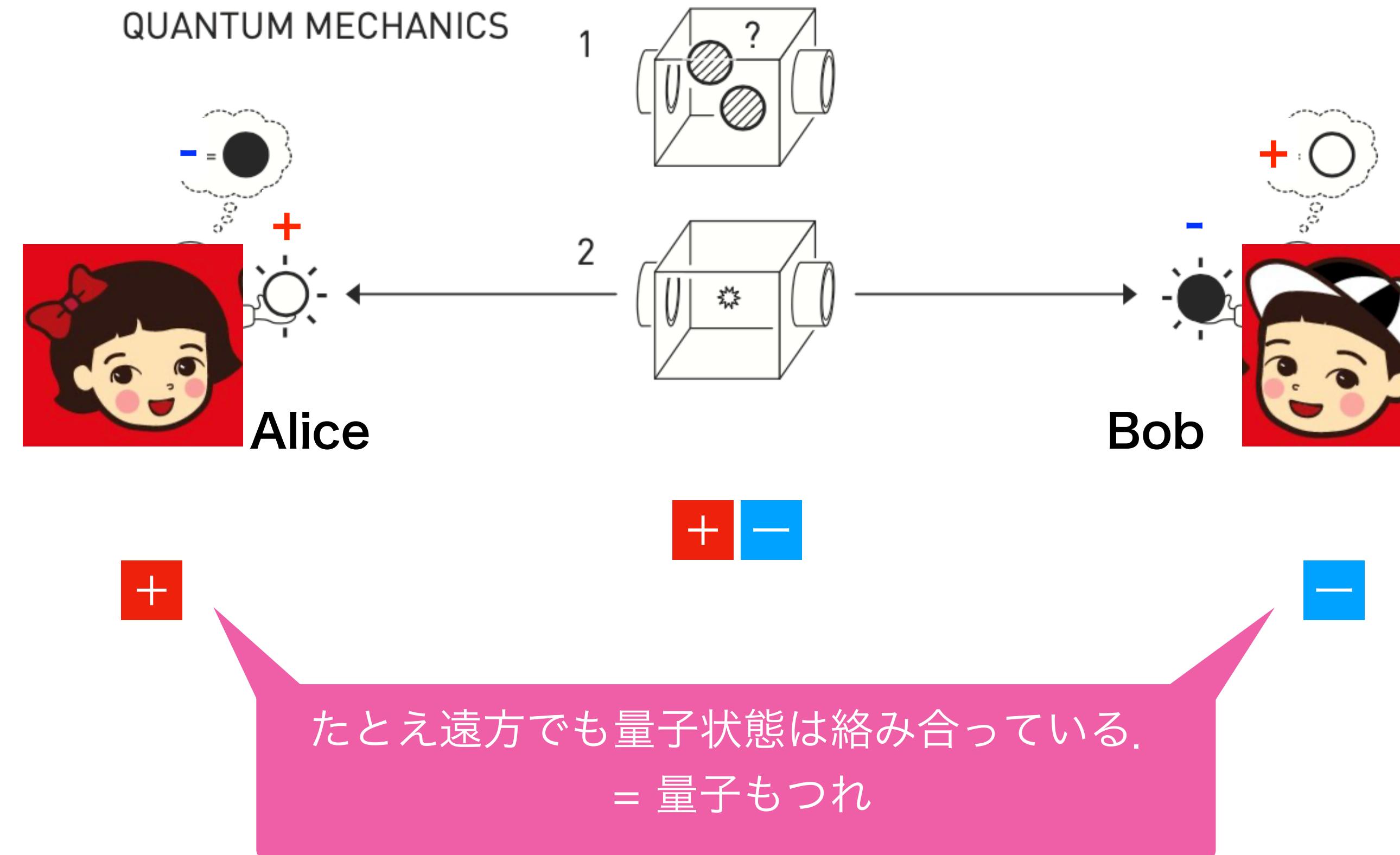
1997  
1998anton・ツァイリンガー  
オーストリア・ウィーン大

Anton Zeilinger later conducted more tests of Bell inequalities. He created entangled pairs of photons by shining a laser on a special crystal, and used random numbers to shift between measurement settings. One experiment used signals from distant galaxies to control the filters and ensure the signals could not affect each other.



量子もつれの光子を2組作成し、ランダムに実験装置に照射した。遠方の銀河からの電波信号を用いてフィルタを調整することで、光子双方が互いに無関係な状態であることを保証した。

# 量子もつれ (quantum entanglement)



EPRが仮定した、物理量の局所性と実在性の2つは、同時には成り立たない。

光速を超えて影響は及ばない

たとえ観測しなくとも現象は存在する

コラム 28 EPR 論争の決着

アインシュタインは、量子力学の有用性を認めながらも、不確定性原理や確率解釈が導く因果律の破綻や不確実性を嫌い、物理学のあるべき姿をめぐって論争を続けた。アインシュタインが、ポドルスキーローゼンの3人で指摘した「測定した瞬間に、因果関係のない十分遠方の粒子の物理量が決まるはずだ。これを不確定としている量子力学は不完全だ」と問題提起した『EPR パラドックス』は、量子力学が普通の常識では収まらないことを指摘した最たるものである。だが、『物理的実在とは何か』という実証不可能で高尚な問題に発展してしまったアインシュタイン・ボーア論争は、彼らの死後は長い間、物理学者から敬遠され、無視された。

この状況は、1964年に一変する。ベル(John S. Bell, 1928–90)によって、EPRの議論が正しいかどうか実験で確かめる手段が考えだされたためである。ベルは、「EPR論文が仮定した、物理量の局所性と実在性の2つを認めた場合、2つの粒子のスピンの相間に上限が存在する」ことを定理(ベル不等式)として示した。これは、ベル不等式が破れていれば、EPRの仮定が誤りで、量子力学の考えが正しいことを意味している。

そして、1982年、アスペ(Alain Aspect, 1974-)によって量子もつれ状態にある2つの光子を用いた実験が行われ、ベルの不等式は破れている(すなわち、EPR論文の仮定は正しくない)ことが示された。ベル不等式の検証は、その後も多くグループによって、陽子や原子イオンを用いて追試されており、いずれも高い精度で、量子力学の予言が正しいことを示している。

この結果、私たちは、物理量の局所性と実在性のどちらかを破棄しなければならなくなつた。局所性を捨てるということは、光速を超えて情報をやり取りすることができるものを許すことになる。しかしそれは相対性理論と矛盾するし、これまで私たちが信じてきた因果律をもとにした物理学を否定することになる。そう考えるなら、実在性を捨てることになる。しかし、測定することによって、私たちは対象が客観的な存在になると考えるが、客観的な実在がないとすれば、どう解釈したらいいのだろうか。いまだ多くの物理学者に納得のゆく答えは出されていない。

かつてアインシュタインは、友人ペイス (Abraham Pais, 1918–2000) に向かって「月は君が眺めている間だけ実在しているなどということを、ほんとうに信じているのか」と尋ねたという。量子力学の対象を月に拡大解釈したとえではあるが、ベル不等式の破れは、「月は誰も眺めていないとき、そこに実在していない」ことを結論する。量子力学は私たちの常識をはるかに超える結論をもって待ち構えているのである。

(参考：筒井泉, 『量子力学の反常識と素粒子の自由意志』, 岩波書店, 2011)

アインシュタインは友人パイスに向かって尋ねた。

「月は君が眺めている間だけ実在している、などということを、本当に信じているのか」

ベルの不等式の破れは、その通りで

「月は誰も眺めていないとき、そこに実在していない」ことを結論する。



「月が跳ねる3回で“て存在するのか”」の言葉に思わず「確實<sup>(=はっせつ)</sup>と言へます」と。存在<sup>(=しり)</sup>を言中でしまります(=私)。承認<sup>(=しゆのん)</sup>納得<sup>(=なあん)</sup>されません(=私)。(しかし、うれしいワード)は理解<sup>(=りょくせつ)</sup>、複雑な気持ち<sup>(=ふくざつなじめつ)</sup>。

論理的な考えは難しいですが、月の生存の言舌は、"イト"ミスしても誰も気が付かない、たぶんねえと想ひながら聞いてました。



# 前回のミニツツペーパーから

11-4

アインシュタインに会ってから話してみたいことはありますか？

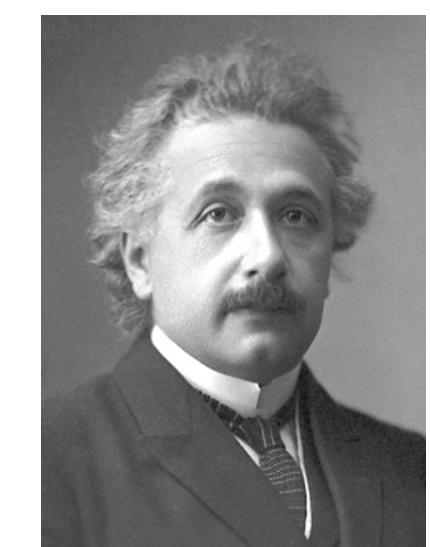
量子論の復習はつまりどうな動画あるか探してみようと思ふ。

重力波は予言から100年経ってようやく検出できたよ。



それはうれしいねえ。もう一個ノーベル賞もらえるかな..

一般相対性理論は、100年経っても  
一番正しい重力の理論だよ。



あたりまえだのクラッカー

EPRパラドックスは成立しないことが実験で確かめられたよ。  
Einsteinの考えは違っていたけど、量子もつれの現象から新しい「量子コンピュータ」が生まれつつあるよ。

量子論が生活の中心になっていくのは、どうも好かんな

# 量子コンピュータ(1)

2019年10月, Googleが, 量子コンピュータを開発, 世界最速のスーパーコンピュータが1万年かかる計算を200秒で終了した, と発表した.

2019年にグーグルが発表したのは「ランダム回路サンプリング」という極めて複雑な0と1の乱数列を生成する問題だが, 実用的な使い道はほぼない.



米国立オークリッジ研究所にある世界最速のスパコン「サミット」  
(U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory提供)



グーグルが開発した量子コンピューターのチップ  
「シカモア Sycamore」

# 量子コンピュータ(2)

量子コンピューターはまとめて計算できる  
(3ビットの場合)

現在のコンピューター

情報を0か1で表現

①	0	0	0	1	0	0
②	0	0	1	1	0	1
③	0	1	0	1	1	0

8通りの情報を1つずつ計算

30量子ビットがあれば、10億通り以上の情報を  
1度に計算できる

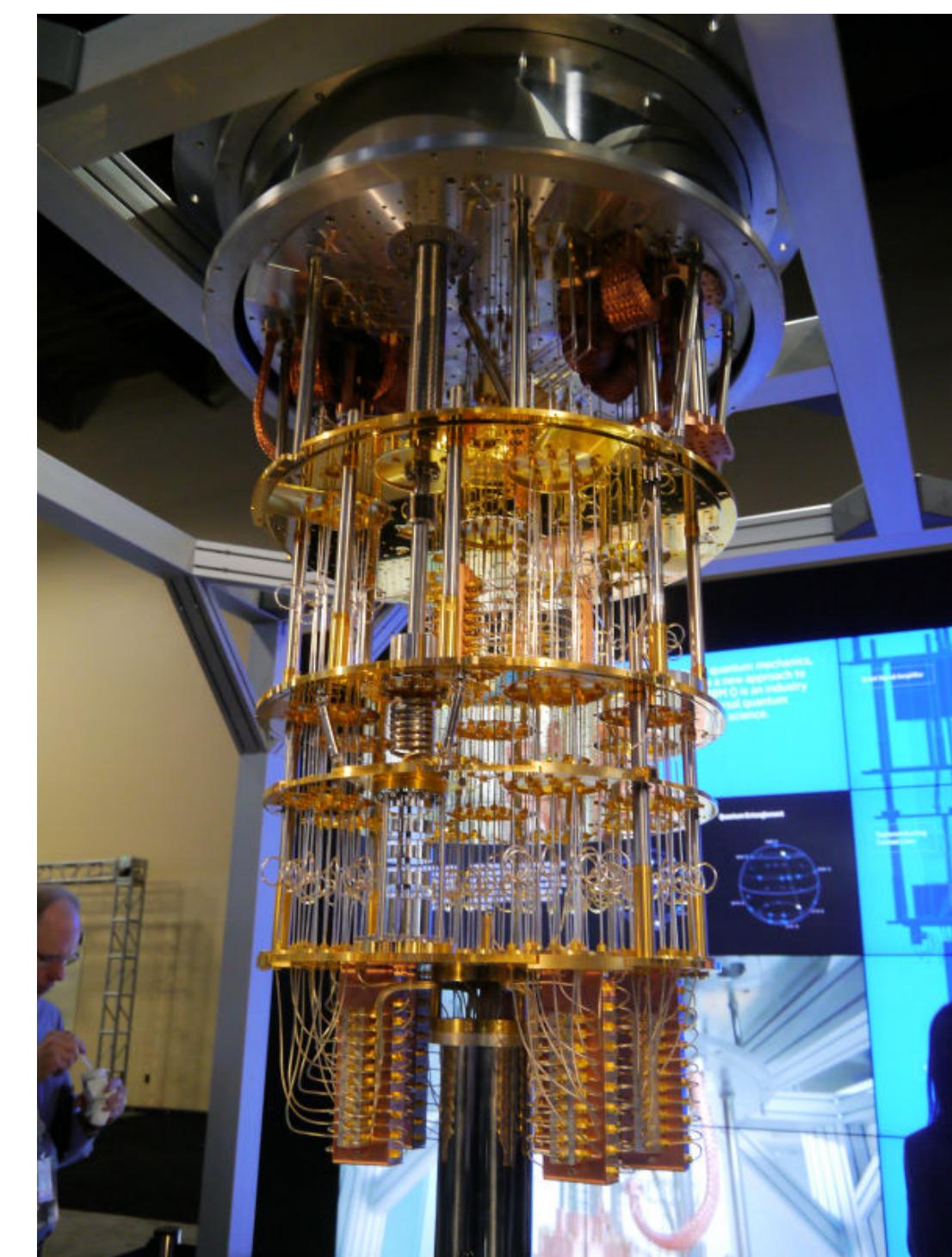
量子コンピューター

0と1の重ね合わせ

0	1
0	1
0	1

8通りの情報を  
1度に計算

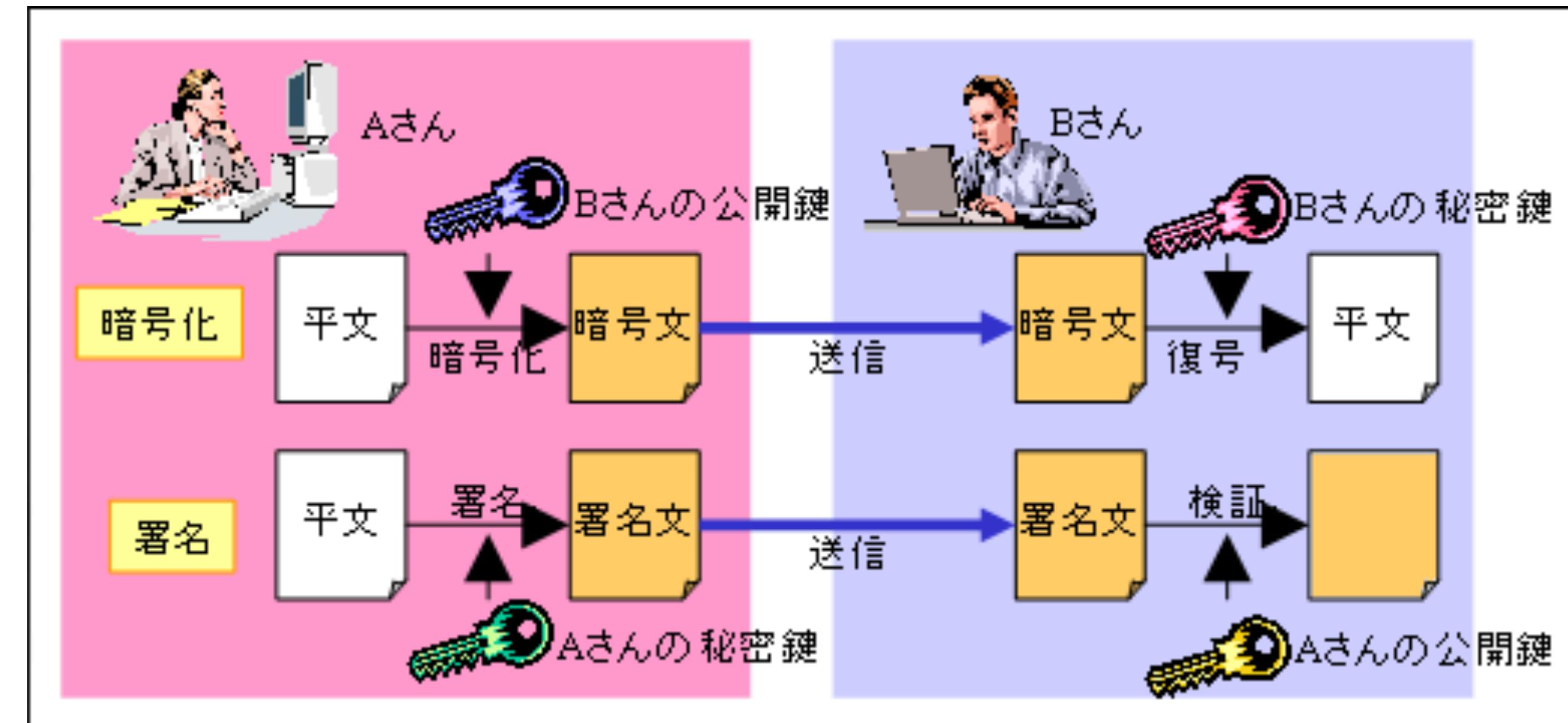
日本経済新聞



IBMが開発している量子コンピュータ

# 量子コンピュータ(3)

インターネット上の暗号が破られる？



<https://www.ipa.go.jp/security/pki/022.html>

```

1230186684530117755130494958384962720772853569595334792197
3224521517264005072636575187452021997864693899564749427740
6384592519255732630345373154826850791702612214291346167042
9214311602221240479274737794080665351419597459856902143413
=
3347807169895689878604416984821269081770479498371376856891
2431388982883793878002287614711652531743087737814467999489
×
3674604366679959042824463379962795263227915816434308764267
6032283815739666511279233373417143396810270092798736308917

```

232桁  
素数  
素数

素因数分解がすぐに  
解けたら暗号が破られる

<http://www.s.osakafu-u.ac.jp/default/3491.html>

# 【話題】 グーグル「量子優位性」示す計算法開発

スパコンの1万3千倍の速さ

2025/11/14

米グーグルが、物理的に意味のある計算で量子コンピューターが従来の計算機を凌駕する「量子優位性」を示すアルゴリズムを開発・実証したと発表した。世界トップ級のスパコンと比べて約1万3千倍速かったという。分子構造の推定にも使える道筋を示し、「現実世界の応用に向けた重要な一步」としている。

グーグルが開発したのは「量子エコー」という量子コンピュータ用のアルゴリズム。量子版バタフライ効果の指標ともいえる値を計算できる。ある量子ビットでの操作が、時間の経過後に別の量子ビットの測定に与える影響を調べることで、情報がどれだけ複雑に絡み合いながら拡散したかを定量化できる。「OTOC」という値で、量子カオスやブラックホール物理学の研究で実際に使われている。

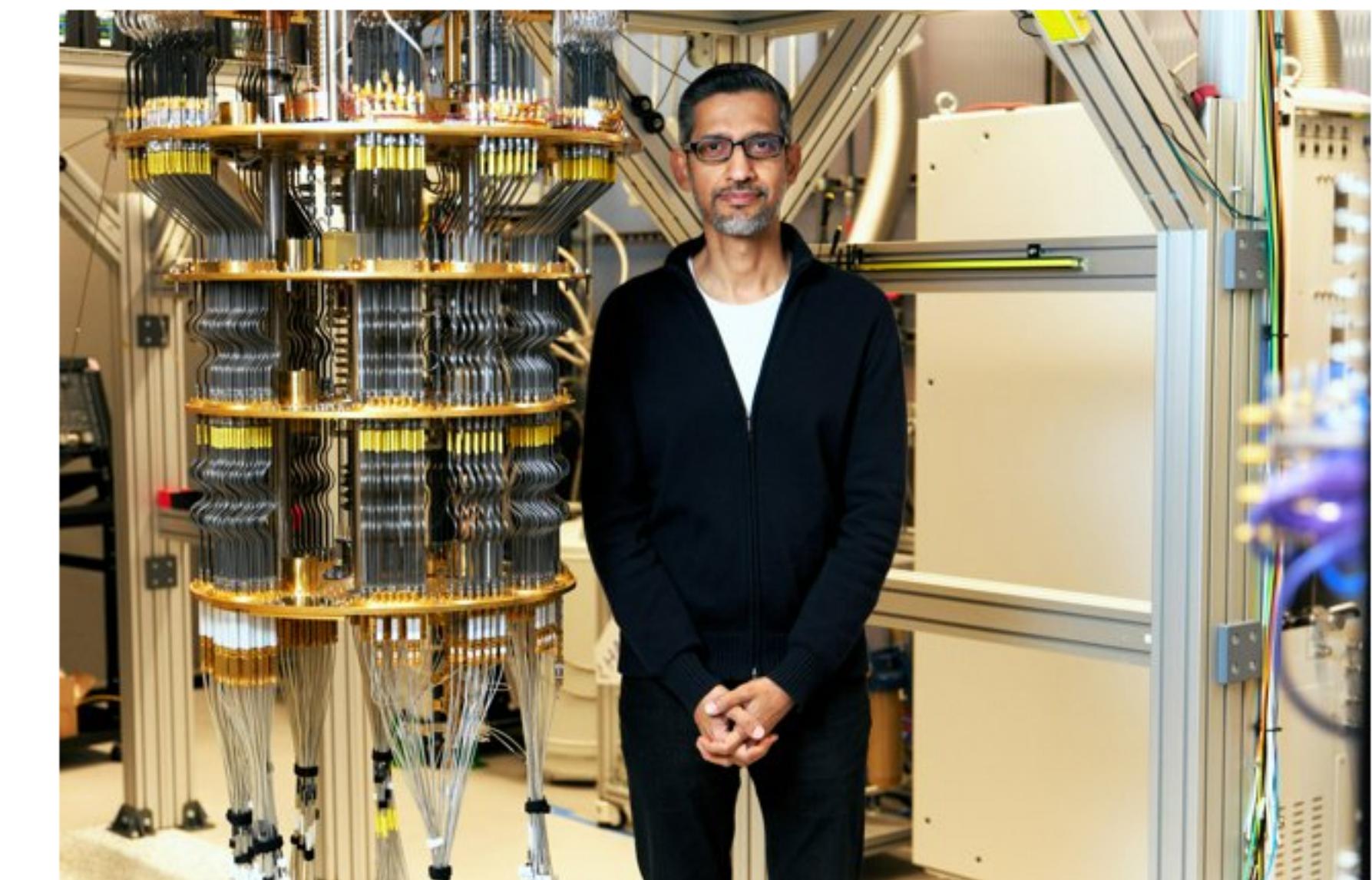
グーグルは、2024年に開発した最新型の量子チップ「Willow(ウィロー)」でこの値を計算。全105量子ビットのうち65ビットを使って2.1時間かかった。この計算には、世界ランク2位の米国のスパコン「Frontier(フロンティア)」でも推計約3.2年かかるという。

さらにグーグルは、実用的な使い道として、分子構造の推定に役立てる「原理実証」を分子構造を調べる「核磁気共鳴(NMR)」と組み合わせる手法で示した。NMRは分子内の二つの原子核スピニンが及ぼし合う力から2点間の距離を測る。ただ、その距離が長いと信号が弱く、測定できないという課題がある。これをクリアしようと、チームはOTOCを使った。

<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09526-6>

<https://arxiv.org/abs/2510.19550>

<https://digital.asahi.com/articles/ASTCD5R86TCDUTFL015M.html>



量子コンピューターの前に立つ米グーグルのスンダー・ピチャイ最高経営責任者（CEO）=同社提供

いままでは「**量子超越性**(Quantum supremacy)」量子コンピューターがスパコンより、「どんな問題」でもいいので速く解けること

今回は「**量子優位性**(Quantum advantage)」「物理的に意味のある問題」を高速で解けること

# 第5章 宇宙論

## 5.1 宇宙が膨張しているとわかるまで 一般相対性理論による膨張宇宙の予言

1929年 ハッブル・ルメートルの宇宙膨張の発見

## 5.2 ビッグバン宇宙論

火の玉宇宙論と定常宇宙論

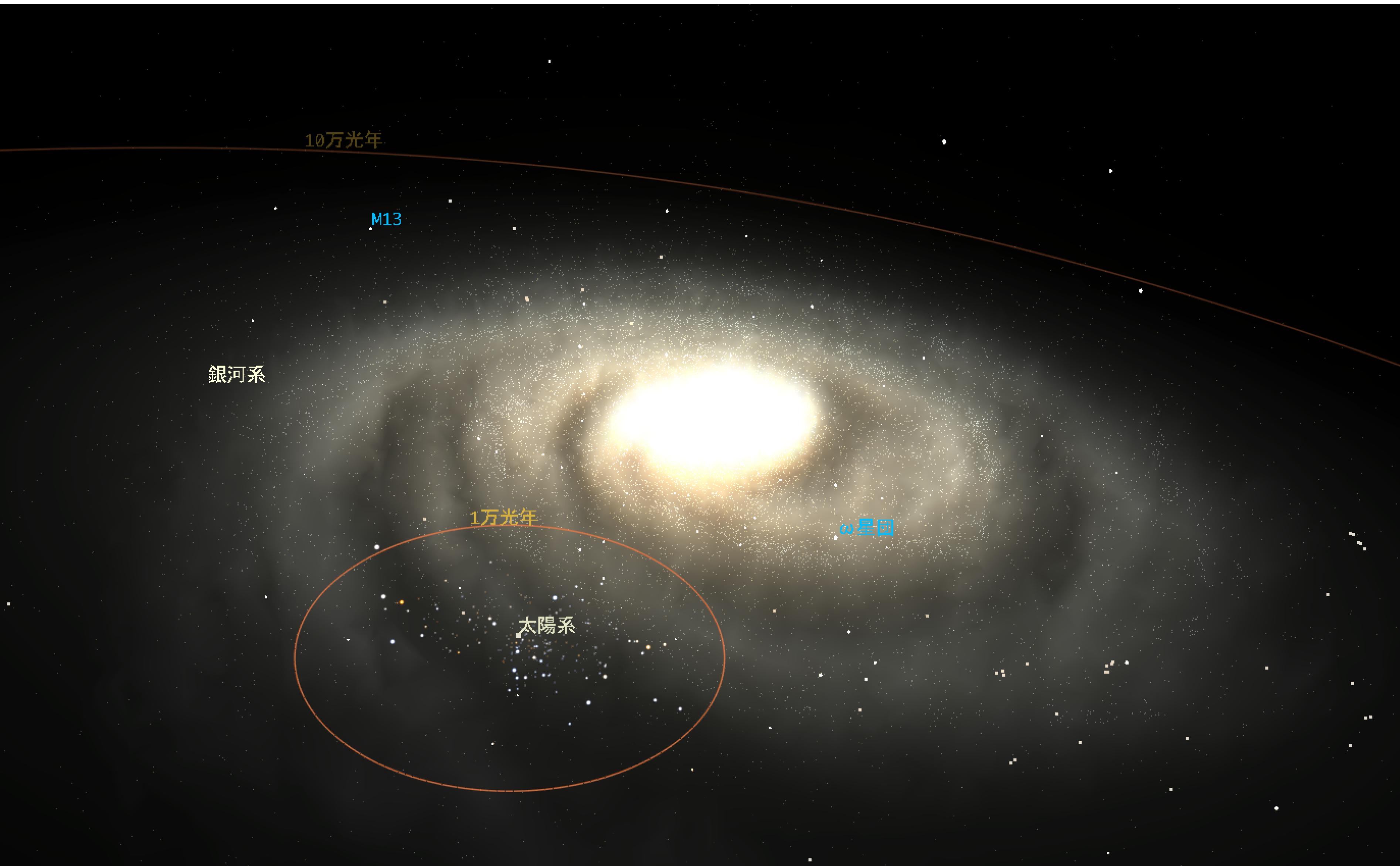
1965年の宇宙背景放射の発見

## 5.3 インフレーション宇宙モデル

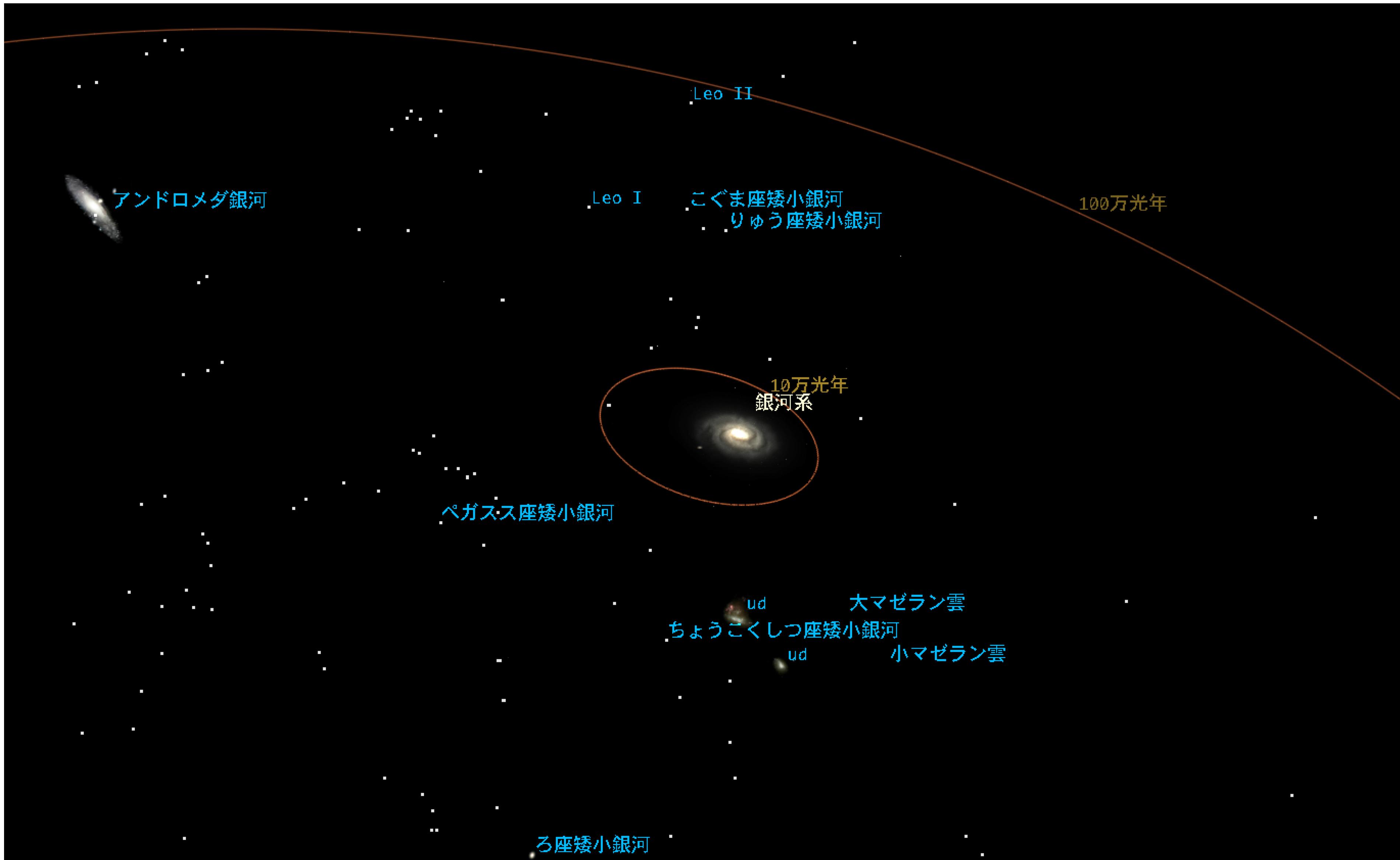
1981年, 佐藤勝彦とグースが独立に提唱

ほぼ確定か? 2014年3月のニュースは誤報だった.

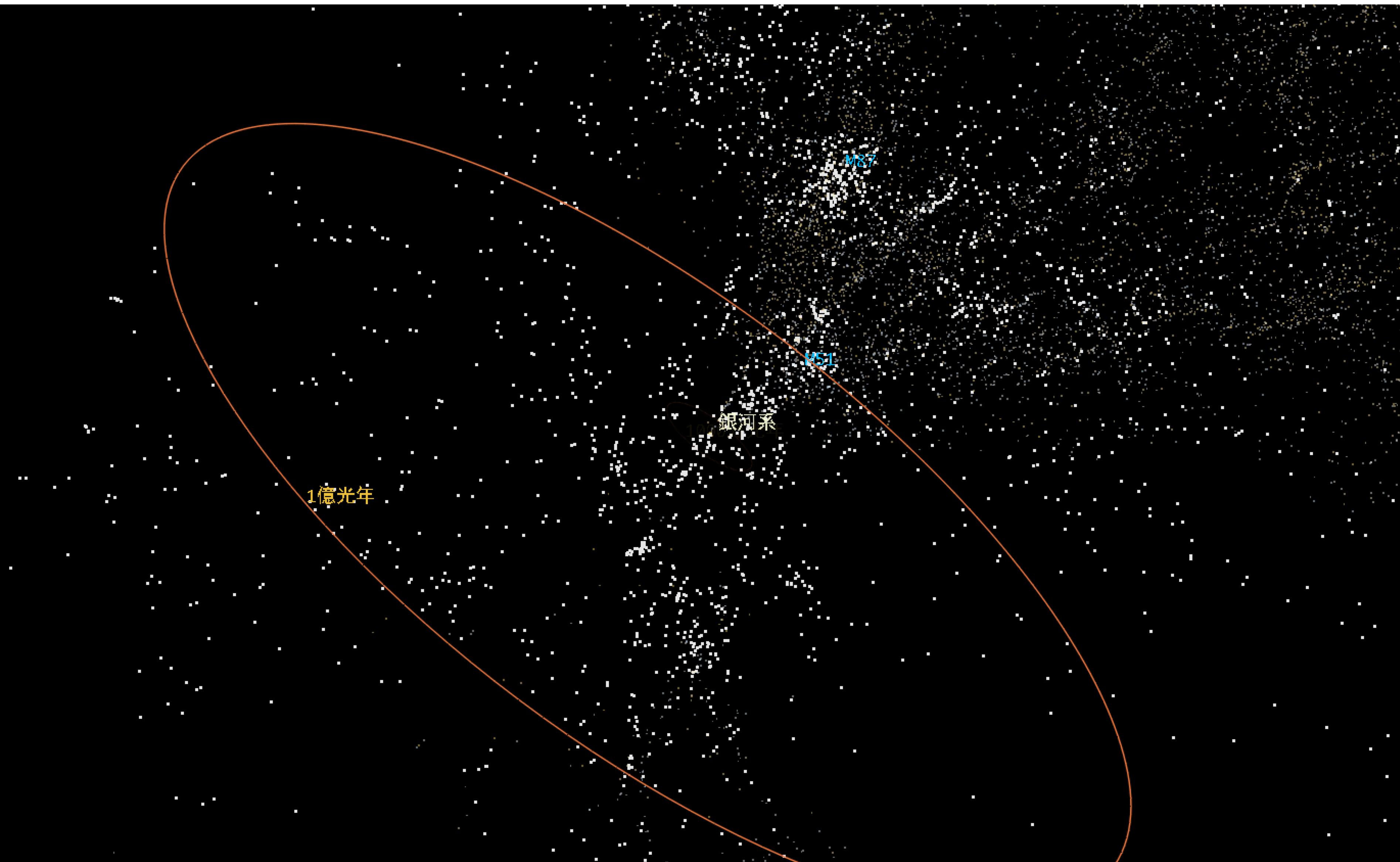
# 天の川銀河 (our Galaxy)



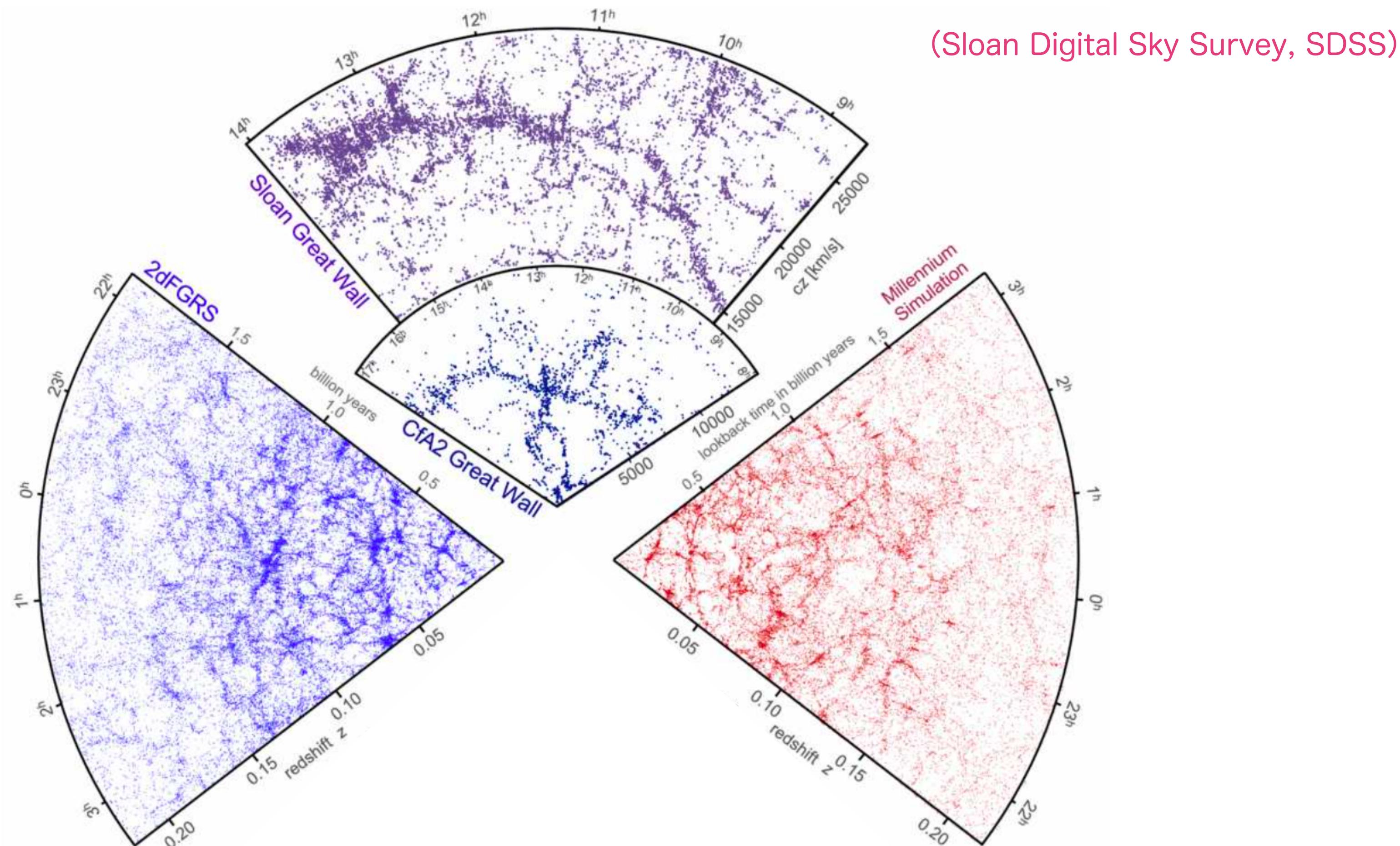
## 銀河群



## 銀河団



# 銀河団 (cluster), 宇宙の大規模構造

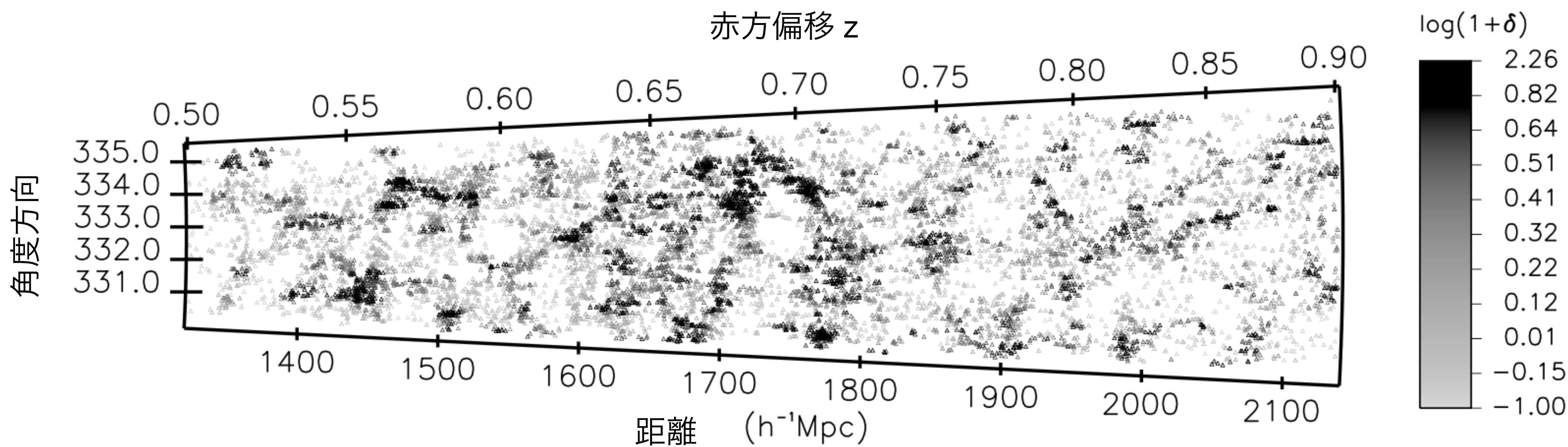


**図 1.35** 銀河の分布観測とシミュレーションによる疑似分布を並べたもの。〔上〕SDSS サーベイによる銀河の分布図と図 1.34 を重ねたもの。SDSS は、北天から見える 65 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している。1.3 億光年の距離に及ぶ 1 万個以上のグレートウォール（万里の長城）も新たに発見された。〔左〕2dFGR サーベイによる銀河の分布図。南天の 22 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している。〔右〕ミレニアム・シミュレーションという数値計算結果を似せて示したもの。[Springel, Frenk, White の論文 (2006) を加工]

65万個の銀河分布を観測 (2006)

# 銀河団 (cluster), 宇宙の大規模構造

1611.07049



**図 1.36** VIMOS サーベイにおける銀河の分布図 (2016). 図 1.35 よりも遠方について、角度を絞って深く宇宙を探査したもので、10 万個の点それが銀河を示す。宇宙誕生から現在までの中间程度の頃の構造を示している。ところどころ銀河分布の少ないボイド構造が見られる。

# 宇宙原理 (cosmological principle)

## 宇宙を考える上での大前提

### 宇宙原理（大意）

私たちは宇宙の中で特別な位置にいるわけではない。（人間が宇宙の中心にいるわけではない。）

### 宇宙原理（物理用語バージョン）

宇宙は巨視的なスケールでは空間的に一様・等方である、すなわち宇宙空間のすべての点は本質的に同等である。

（宇宙は空間的にでこぼこがなく、どちらを向いても同じである。）

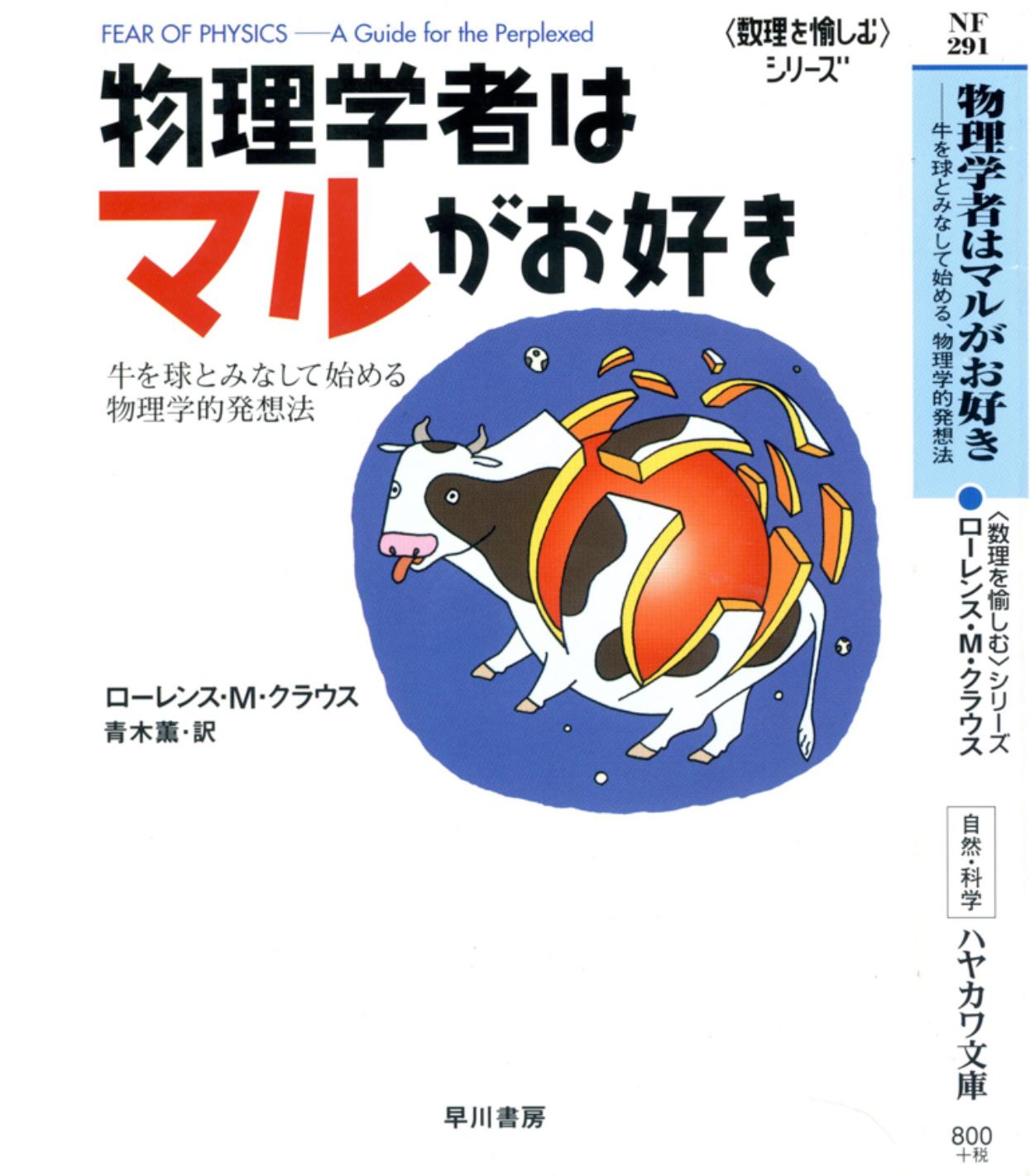
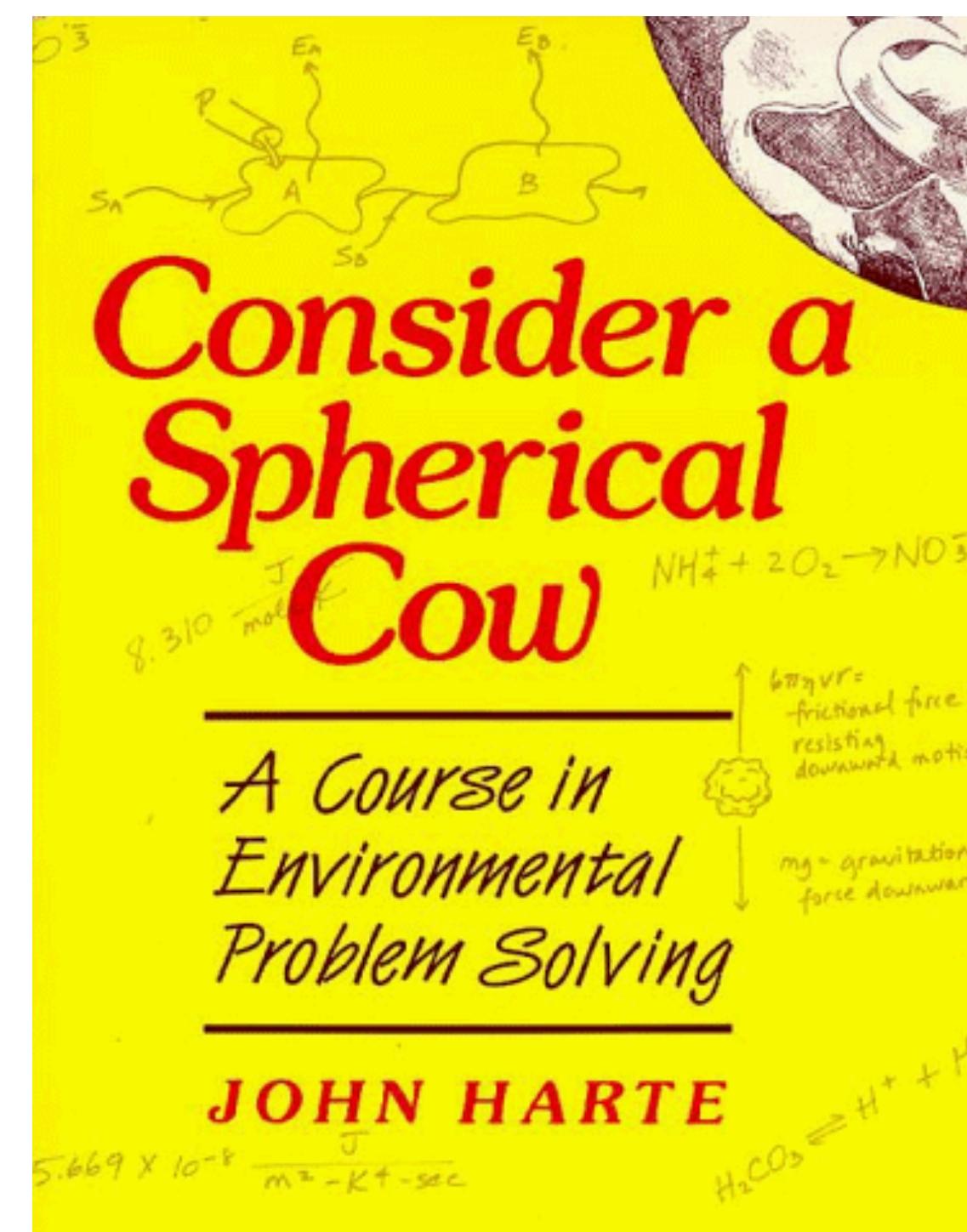
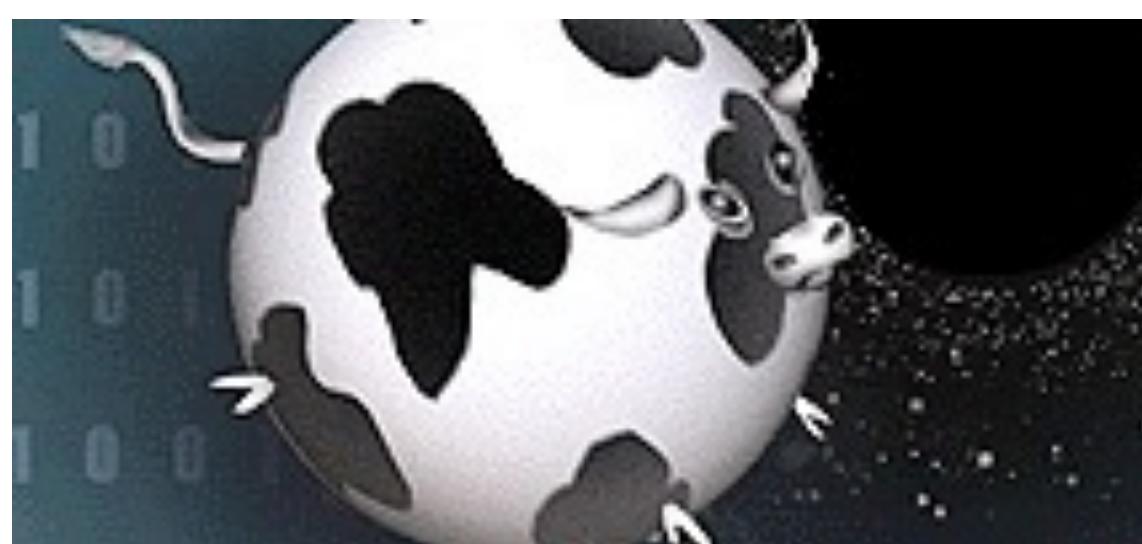
# 物理学者の思考回路 乳牛の乳の生産量を増やすには？

「乳牛の乳の生産量を増やすにはどうしたらよいか」

(畜産学者) 「餌を変えよう. 牛小屋を改良しよう. 」

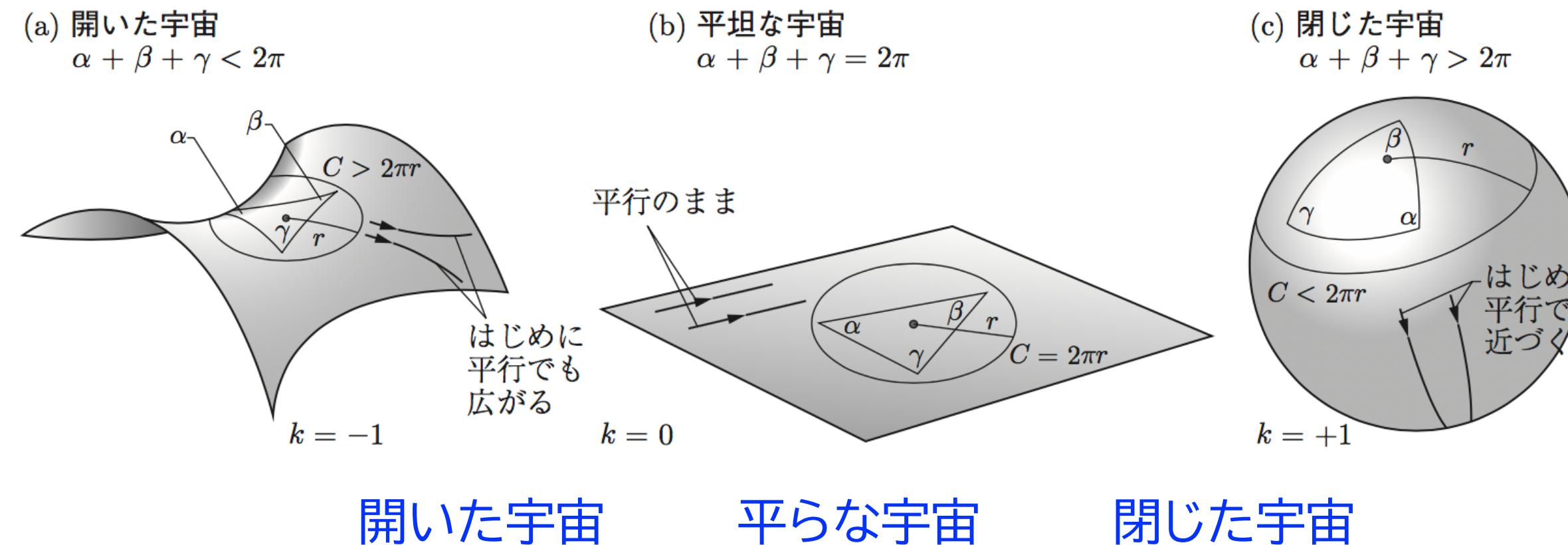
(遺伝学者) 「牛の品種改良を考えよう」

(物理学者) 「まず, 球対称の牛がいた, と考えよう」



# 宇宙原理 (cosmological principle)

→ 球対称時空として、3つのタイプが許される



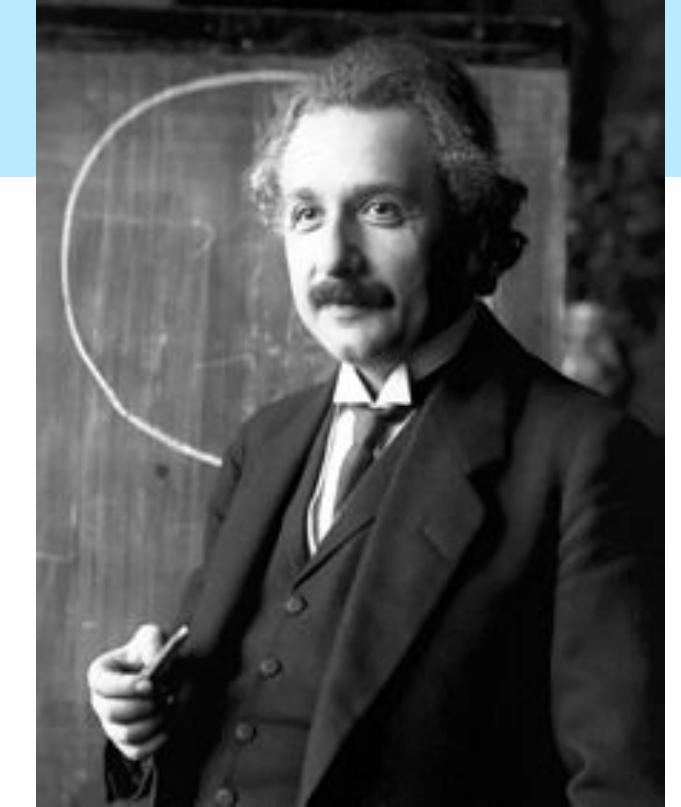
→ アインシュタイン方程式を解くと、大きさが時間と共に変化する時空の解(フリードマン解)が出てくる

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right]$$

Friedmann, Robertson, Walker, Lemaître (1920s)

完全流体、一様等方時空（球対称）でのEinstein方程式の厳密解

# アインシュタインは膨張宇宙を信じなかつた



「宇宙は未来永劫不变であるべきだ」

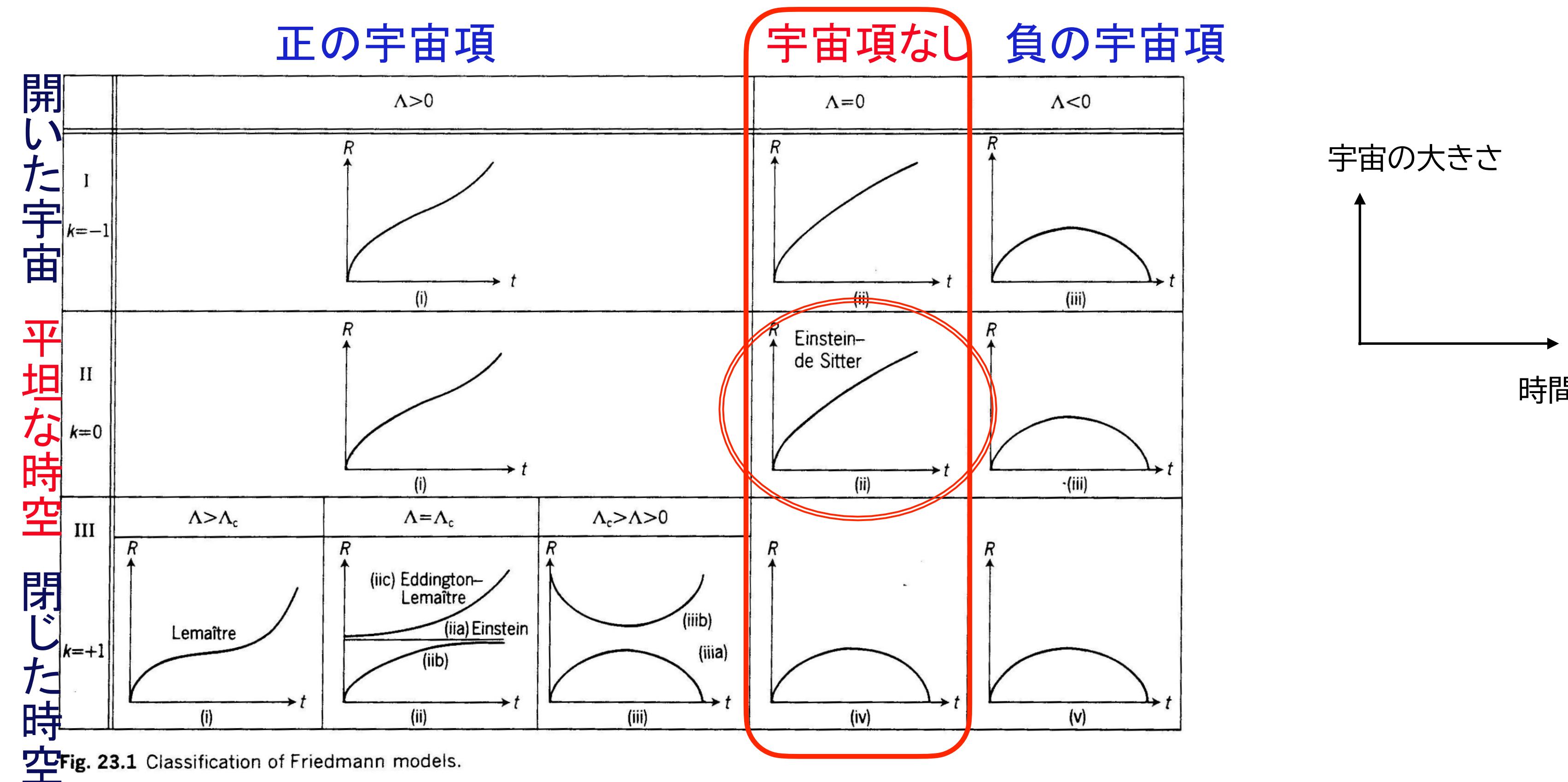
⇒定常的な宇宙モデルをつくるために、方程式を修正  
(宇宙項, cosmological constant)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \boxed{\Lambda}g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

⇒重力（引力）作用に反対する斥力を導入  
ただし、不安定なつり合いの解でしかない。  
アインシュタインらしくない。

# 宇宙全体は膨張・収縮する？

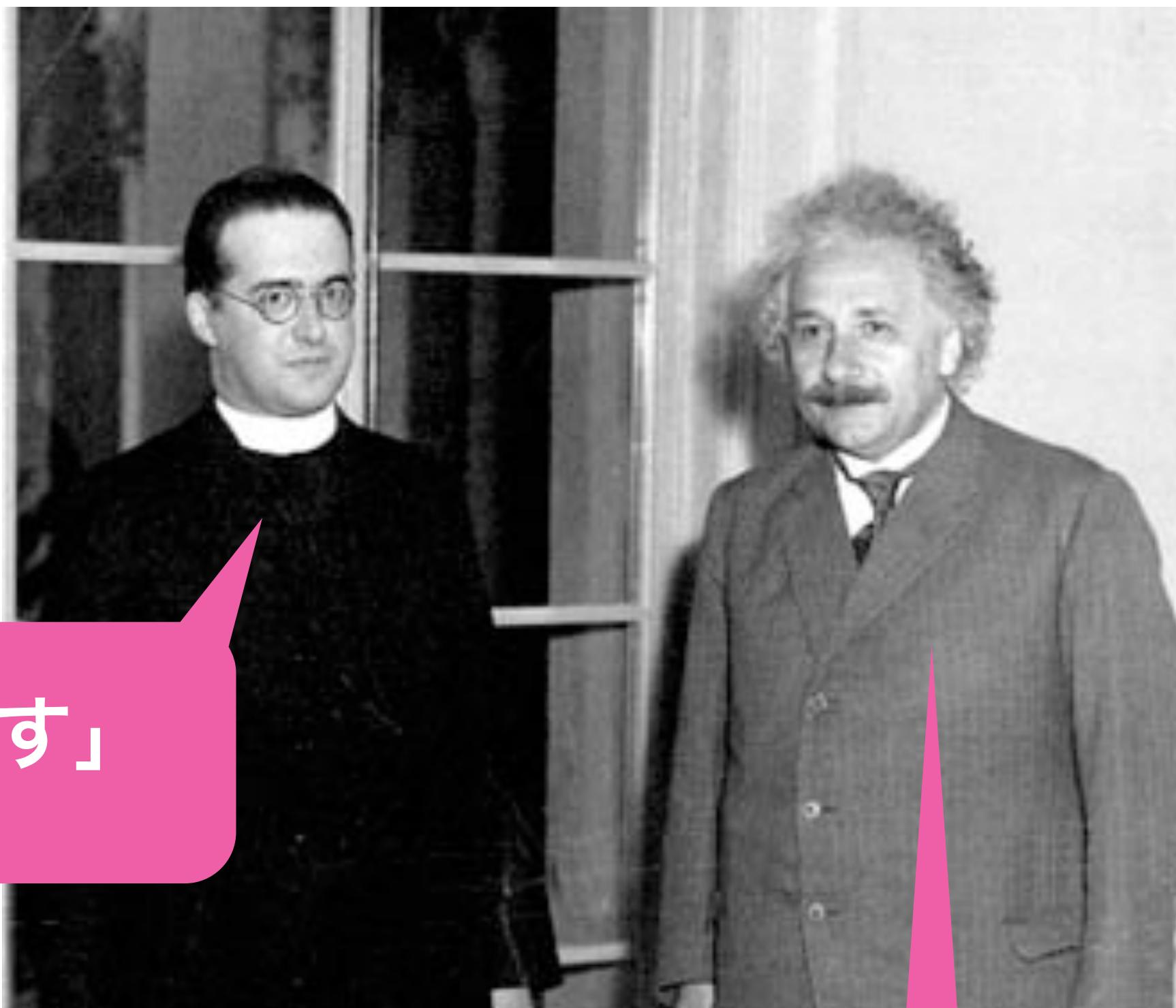
→ 一般相対性理論(時空の方程式)を使って、3つのタイプを計算すると、膨張したり収縮したりする宇宙の解になった



→ 宇宙は不变のもの、と考えていたアインシュタインは困った

# アインシュタインは膨張宇宙を信じなかつた

Lemaitre



「宇宙は膨張するのが自然です」

Einstein

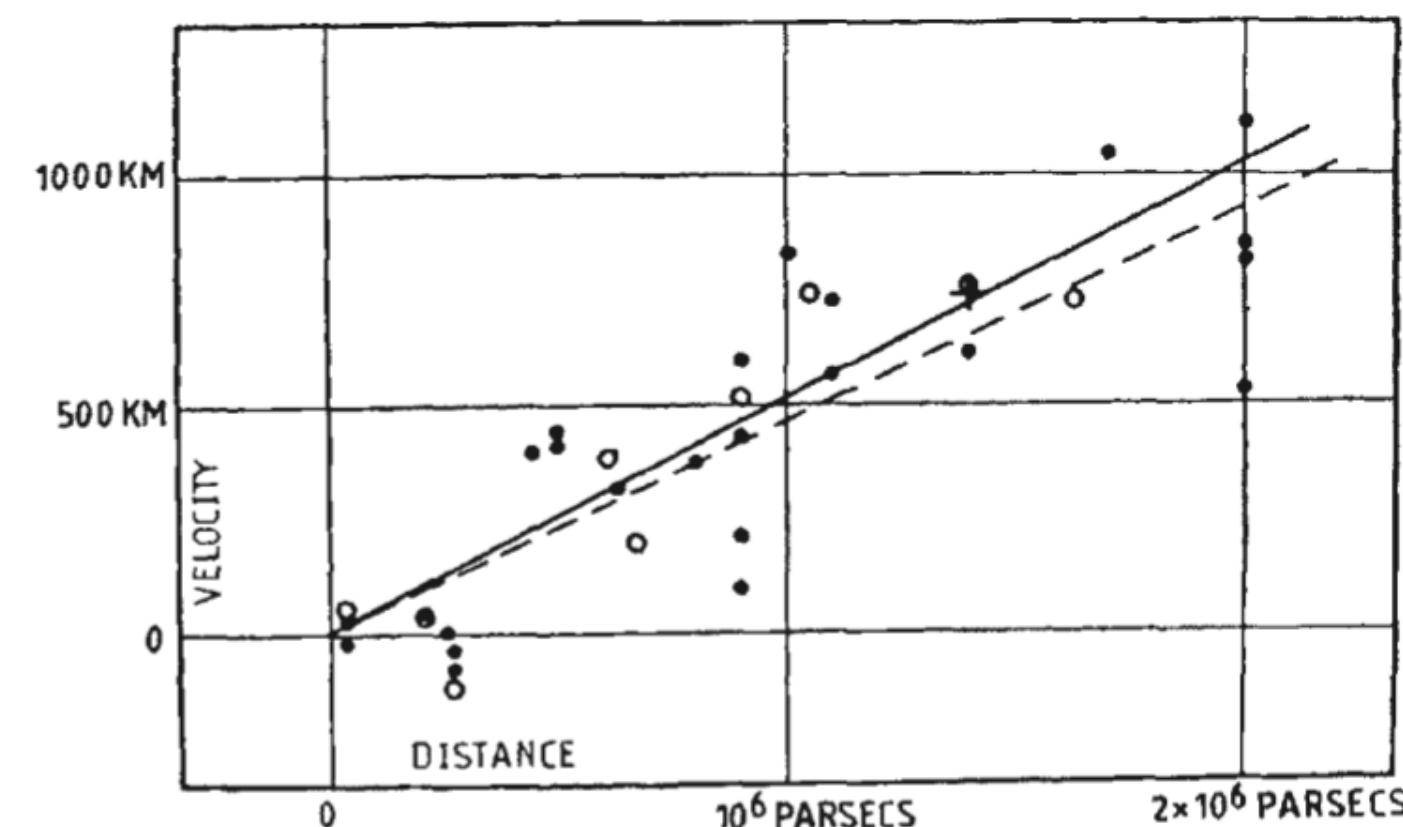
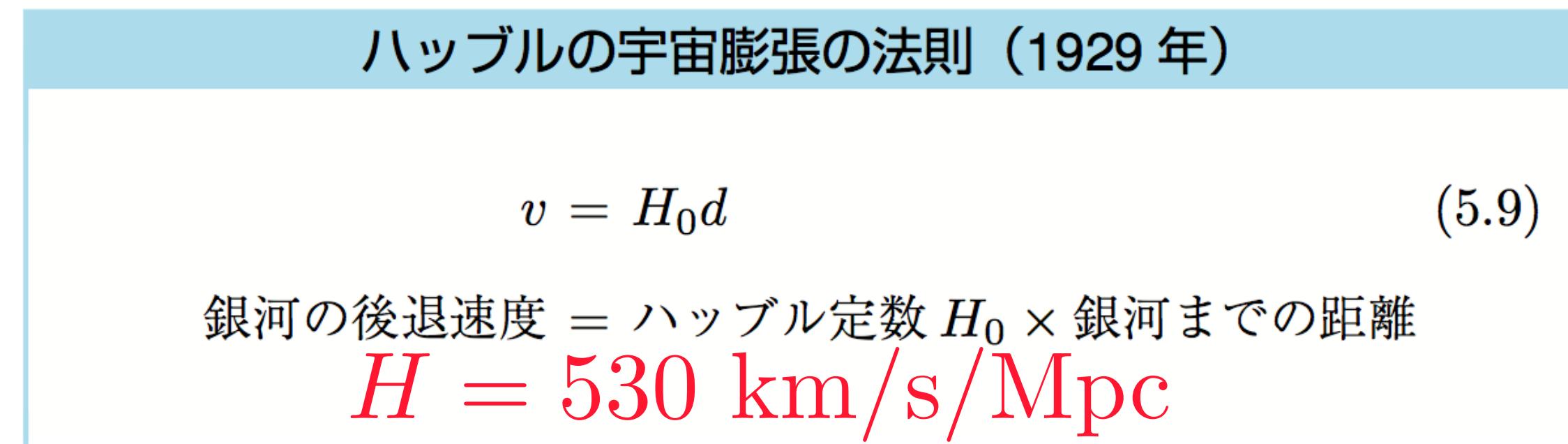
「あなたの計算は正しいが（こんな解を信じるなんて）  
あなたの物理的センスは言語道断だ。」

(Your calculation is correct, but your physical insight is  
abominable.)

# 1929年 宇宙膨張の発見

Edwin Powell Hubble  
(1889–1953)

「ハッブル・ルメートルの法則」と呼ぶことに、2019年、国際天文学連合（IAU）が議決した。



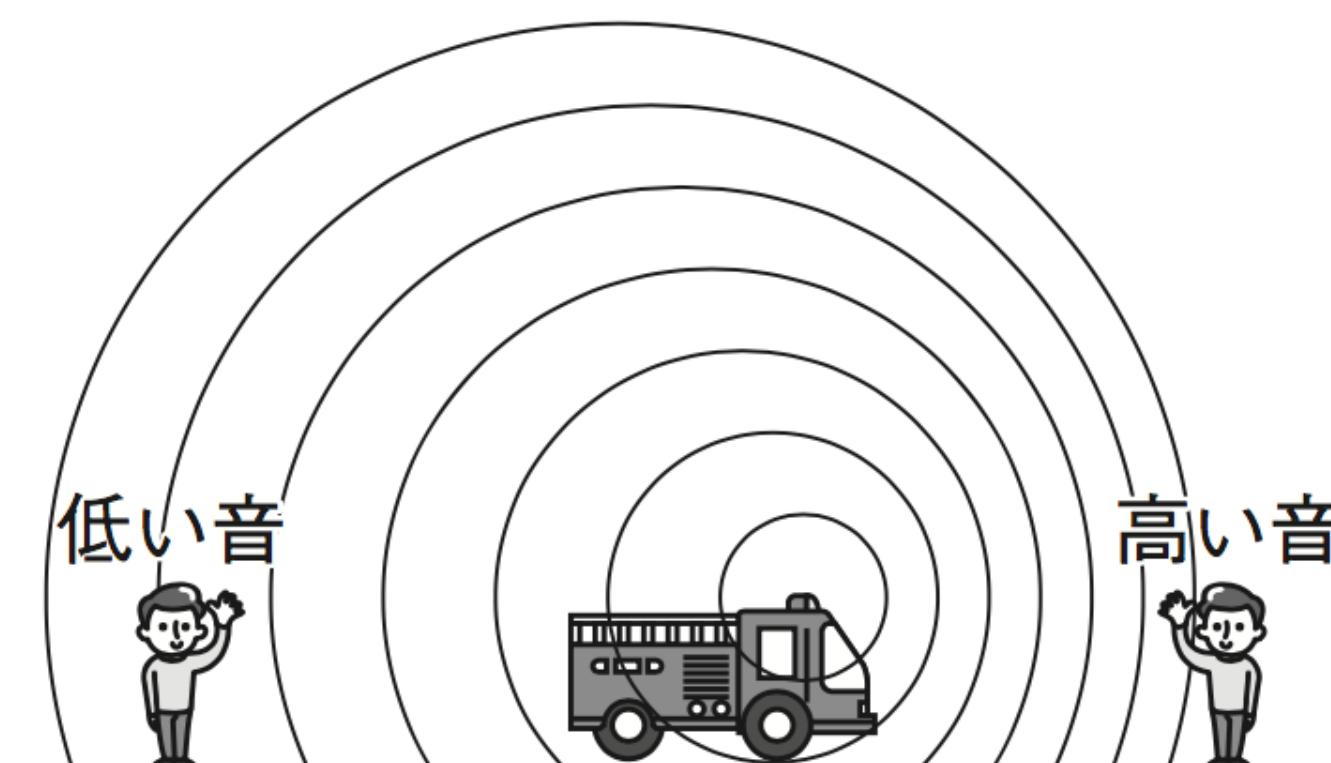
**図 5.7** ハッブルが 1929 年に発表した図。横軸は距離、縦軸は銀河の後退速度。このグラフの傾きがほぼ一定になることが、ハッブルの法則である。ハッブルが報告した値は、 $H_0 = 530 \text{ km/s/Mpc}$  だった。現在値は  $H_0 = 68 \text{ km/s/Mpc}$ 。

宇宙膨張の発見！  
「遠方の星ほどドップラー効果で赤方偏移している」

## 距離の単位 【赤方偏移, red shift parameter z】

名	記号	長さ	定義
天文単位	AU	1億5000万km	地球と太陽の距離
光年	ly	$9.46 \times 10^{12}$ km	光が1年間に進む距離
パーセク	pc	$3.09 \times 10^{13}$ km = 3.26 ly	地球からの年周視差が±1秒角
▶ 赤方偏移	$z$		本来の光の波長のずれの比

光のドップラー効果から星の遠ざかり方を知り、宇宙膨張則から距離を測る



遠ざかるとき

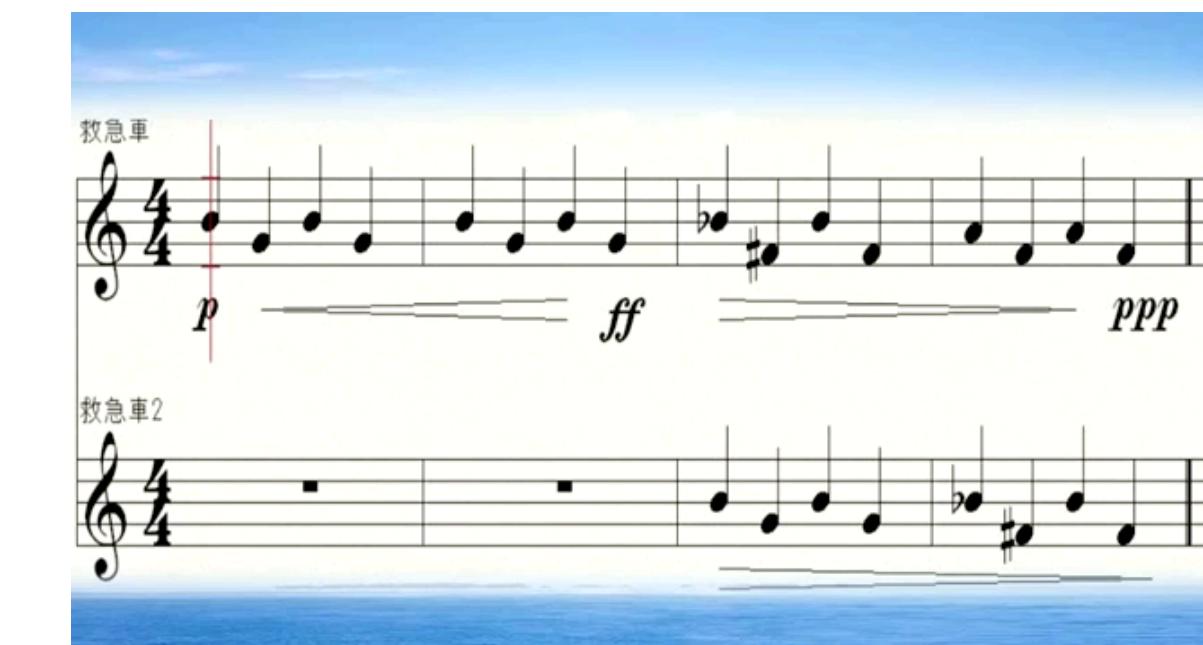
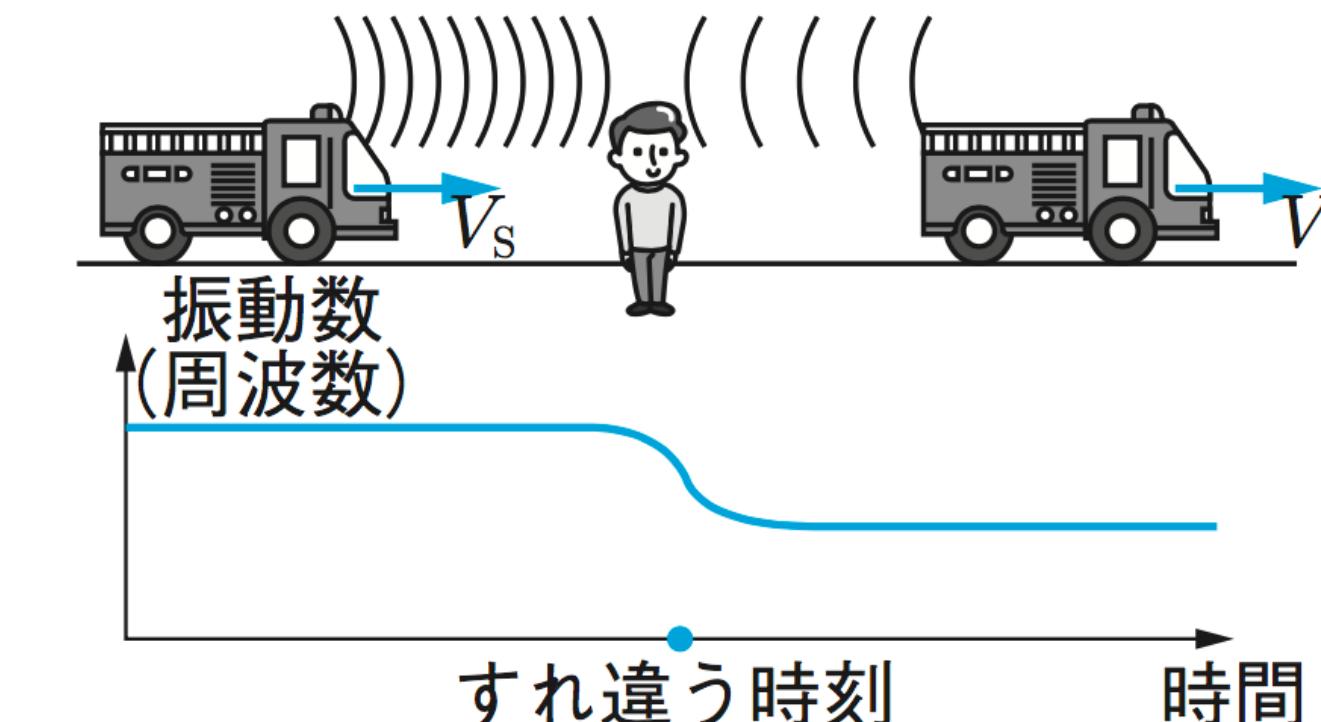
音：低い音

光：赤方偏移

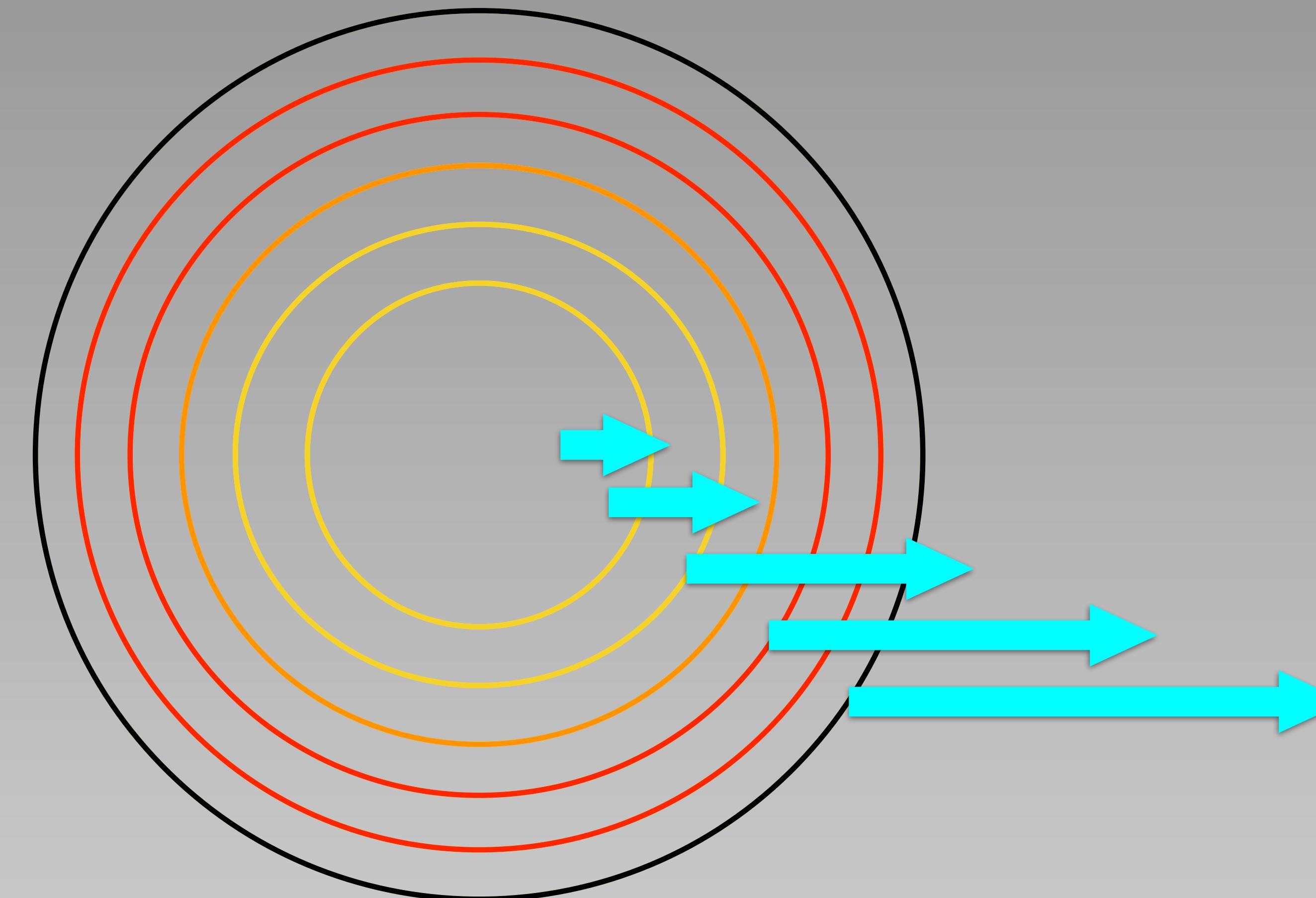
近づくとき

音：高い音

光：青方偏移

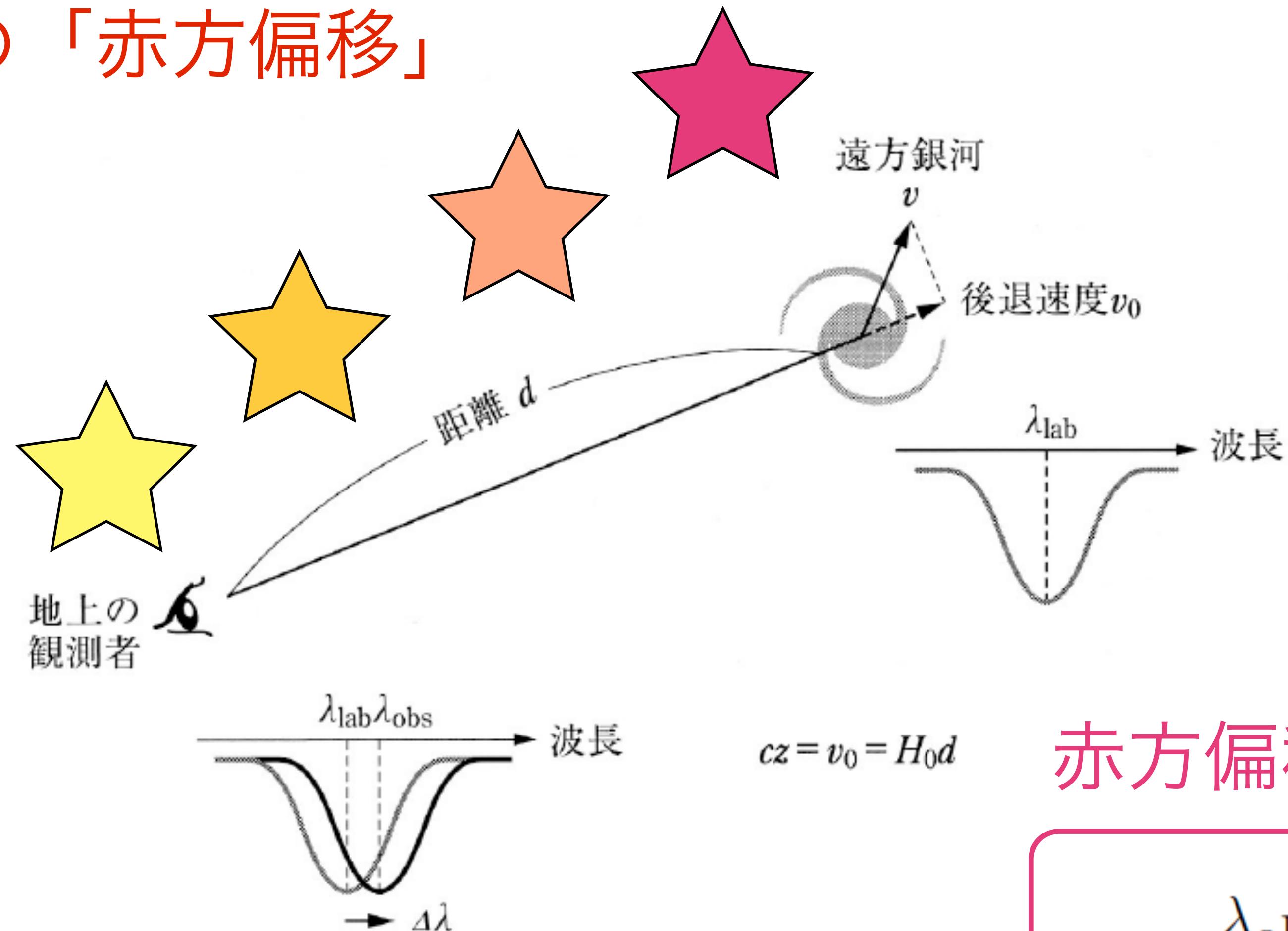


## 光速を超えて遠ざかる遠方の銀河は見えない=宇宙の地平線



光速を超えて遠ざかる遠方の銀河は見えない=宇宙の地平線

## 光の「赤方偏移」



### 赤方偏移パラメータ

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_S}{\lambda_S}$$

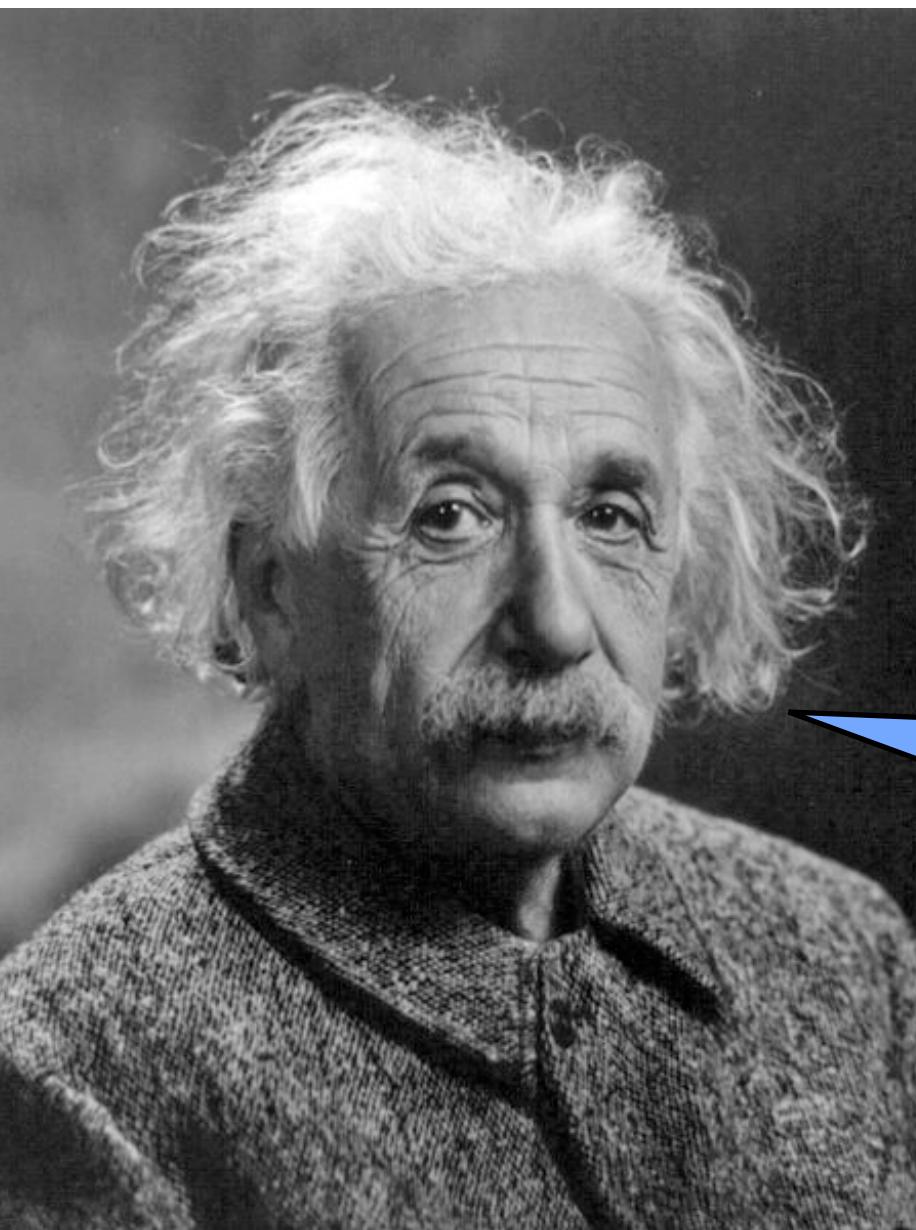


ルメートル (1927)



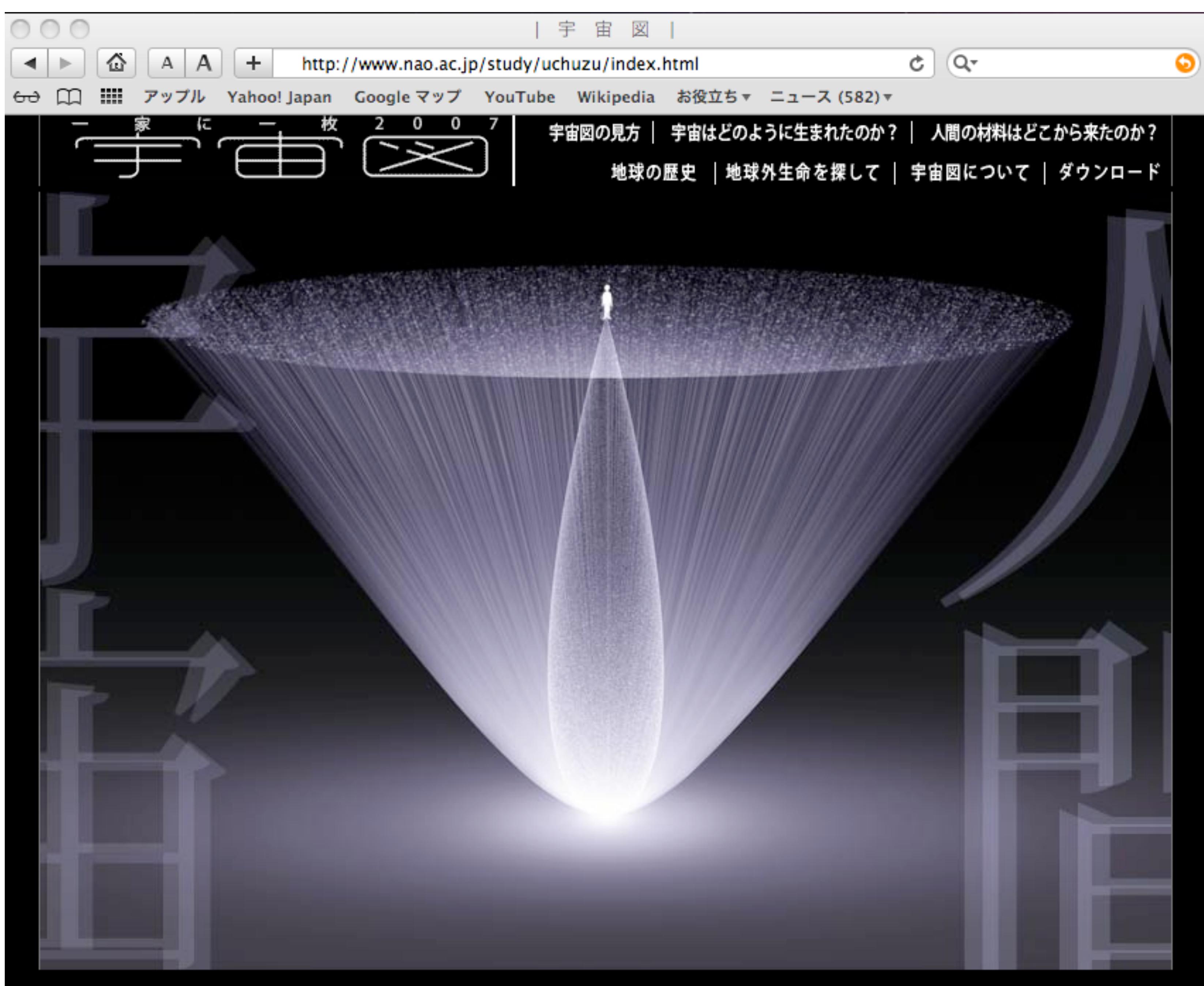
ハッブル(1929)

# アインシュタイン, 膨張宇宙をついに信じる



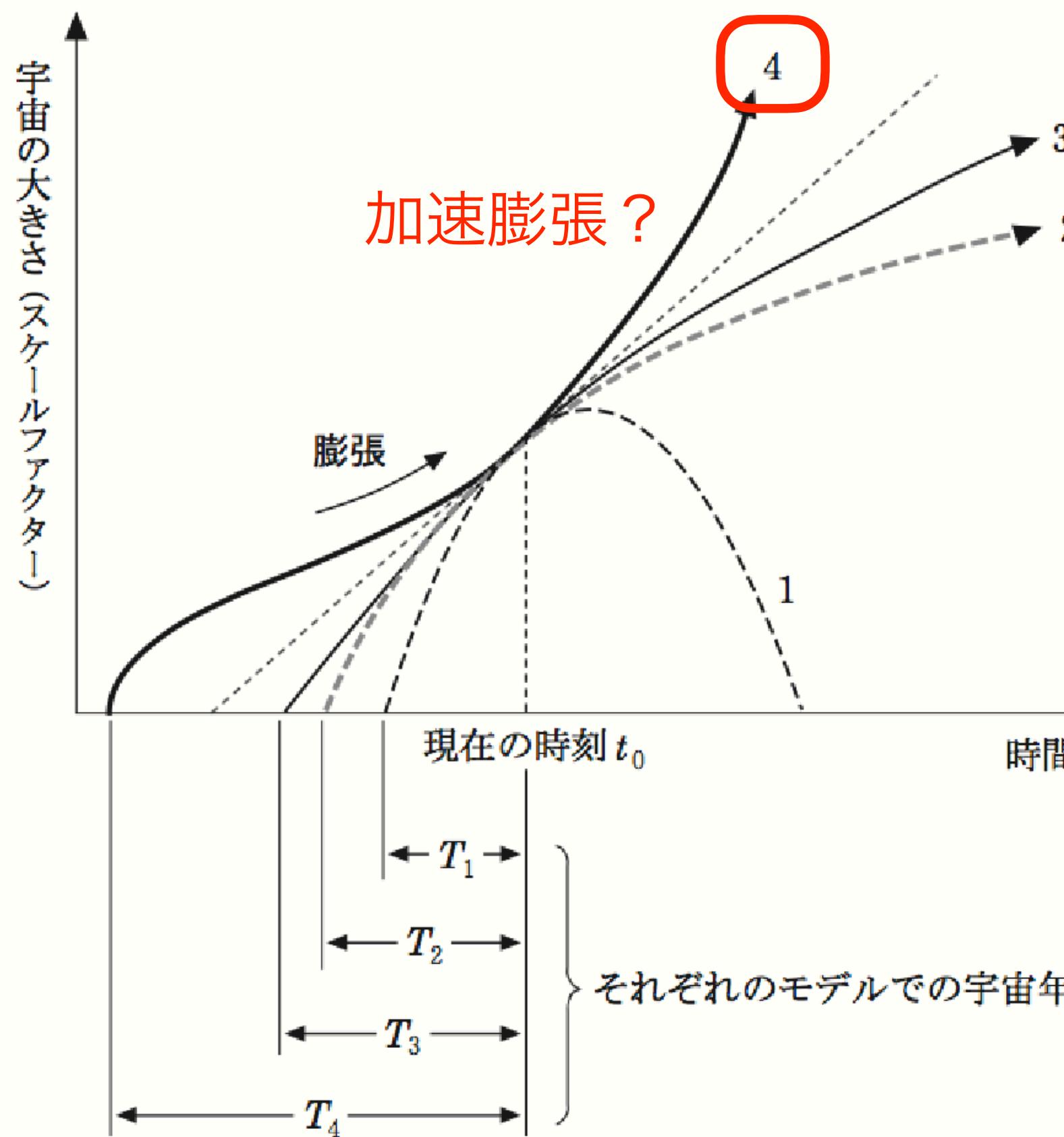
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \cancel{\Lambda g_{\mu\nu}} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

「宇宙項の導入はわが人生最大の過ちであつた」  
(Introduction of cosmological constant  
is the biggest blunder in my life.)



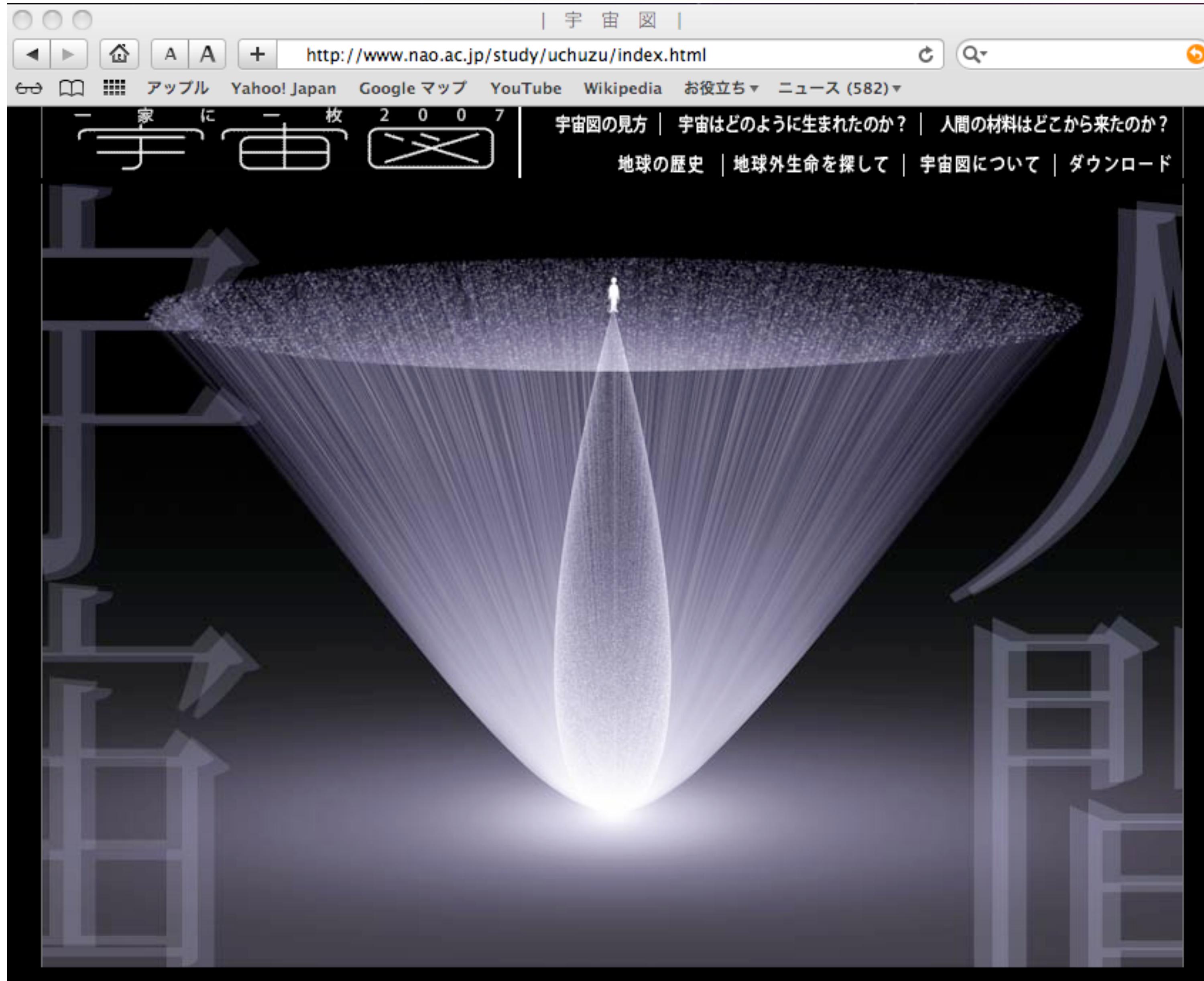
<http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu/rule.html>

## 膨張宇宙モデル、現在考えられているのは？



1. 閉じた宇宙で宇宙項なし.  $\Lambda = 0, k = +1.$
2. 平坦な宇宙で宇宙項なし.  $\Lambda = 0, k = 0.$
3. 開いた宇宙で宇宙項なし.  $\Lambda = 0, k = -1.$
4. 平坦な宇宙で宇宙項あり.  $\Lambda > 0, k = 0.$

# 「一家に一枚 宇宙図」の見方



<http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu/rule.html>

# 宇宙図

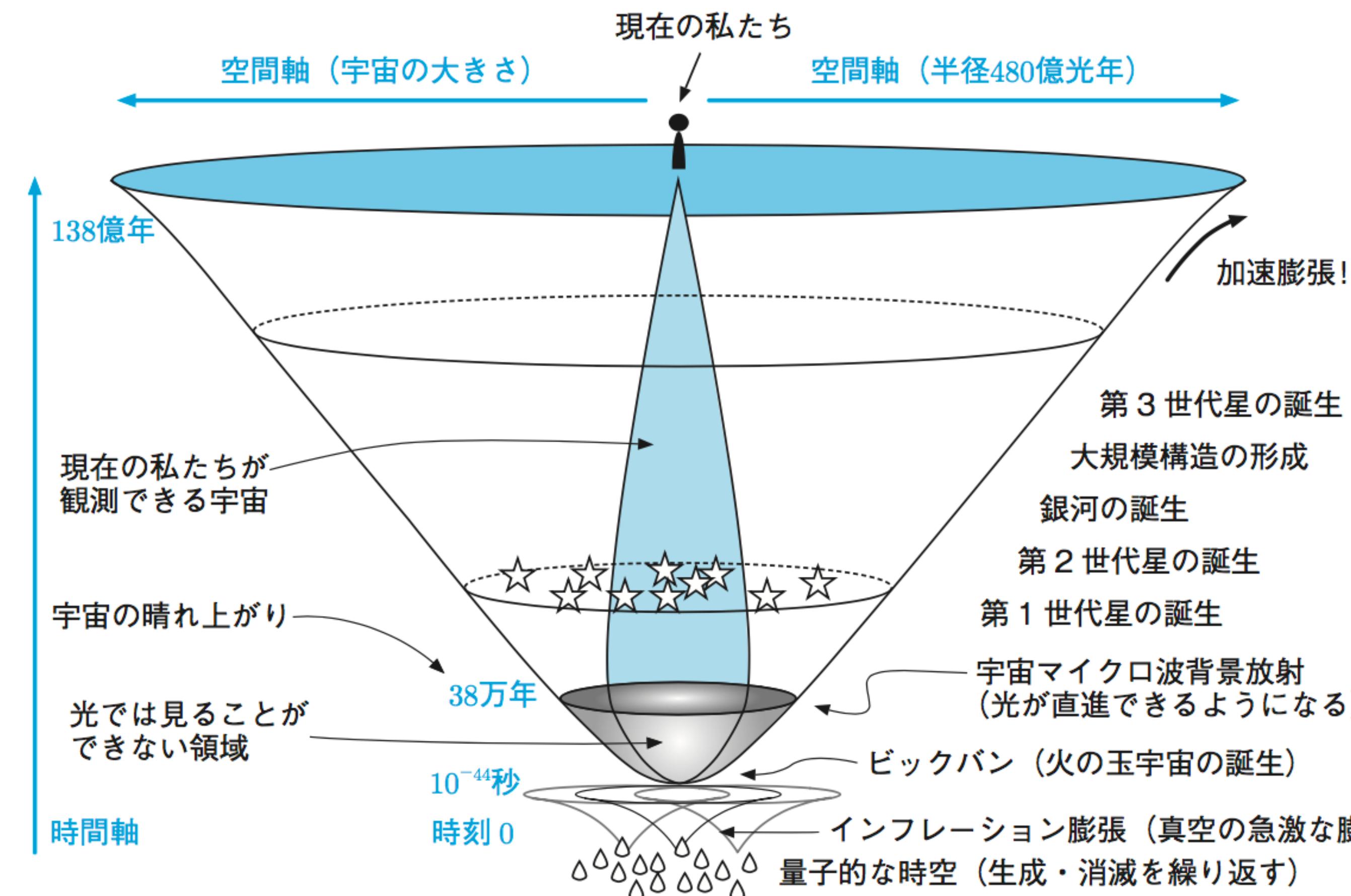
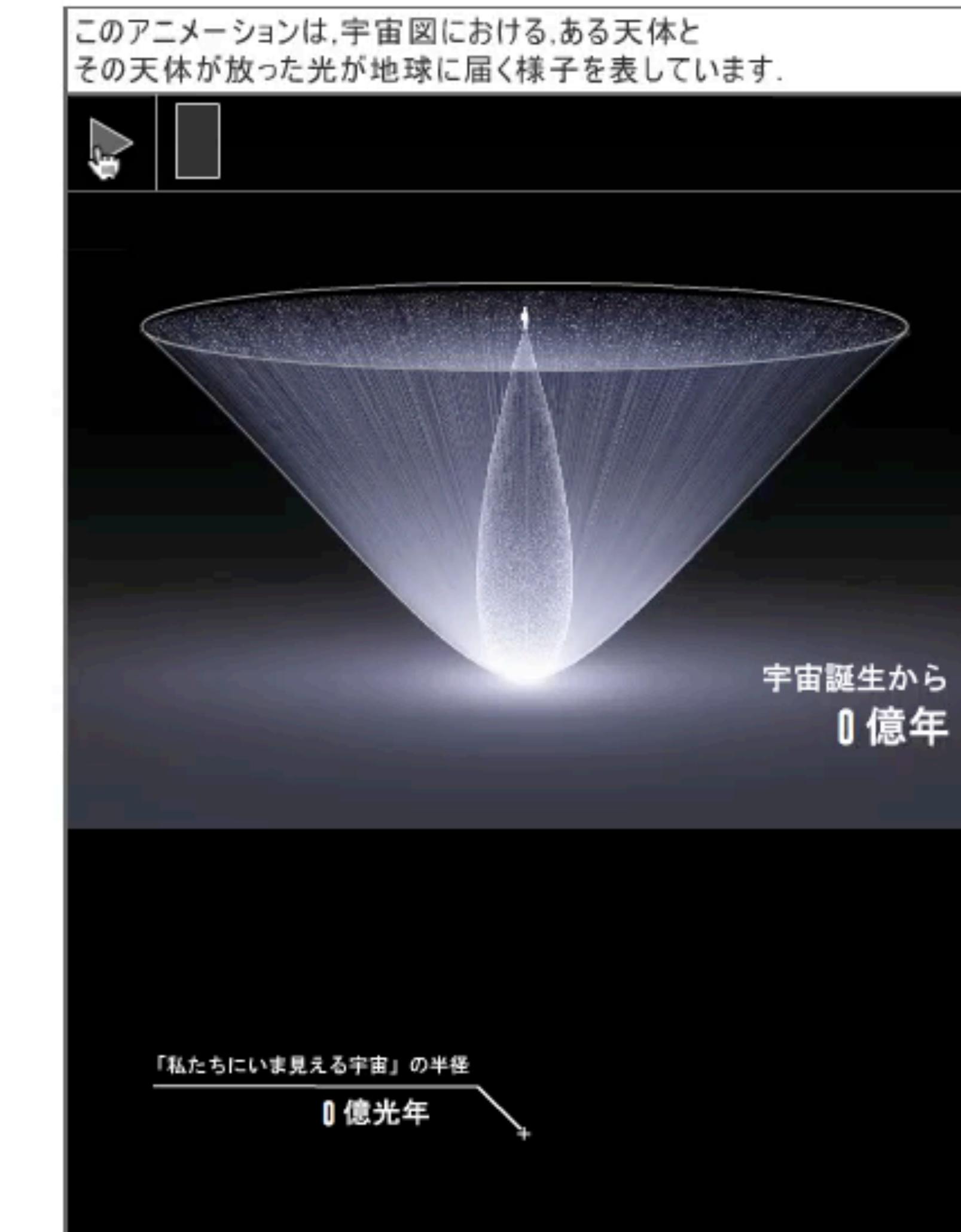
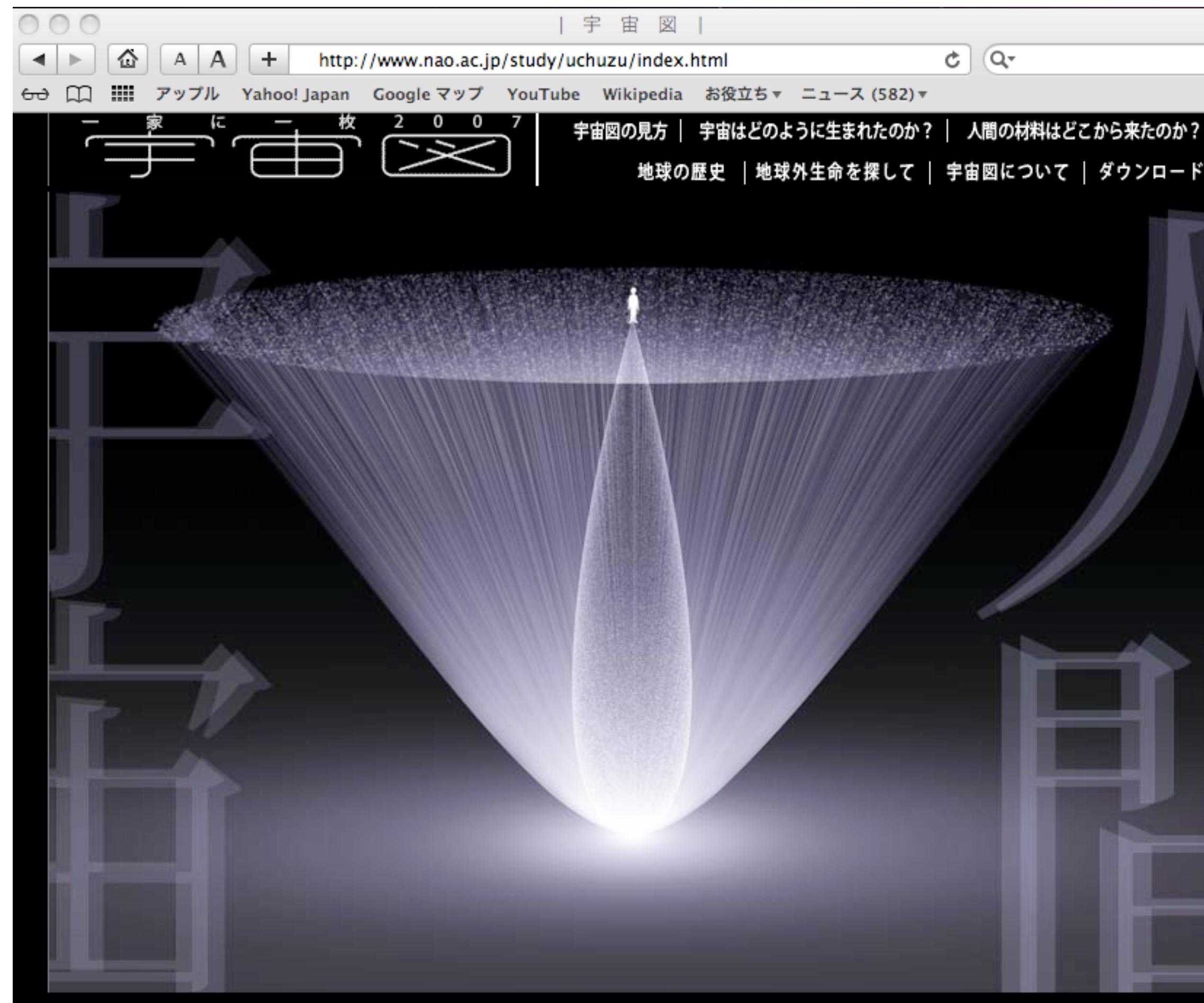
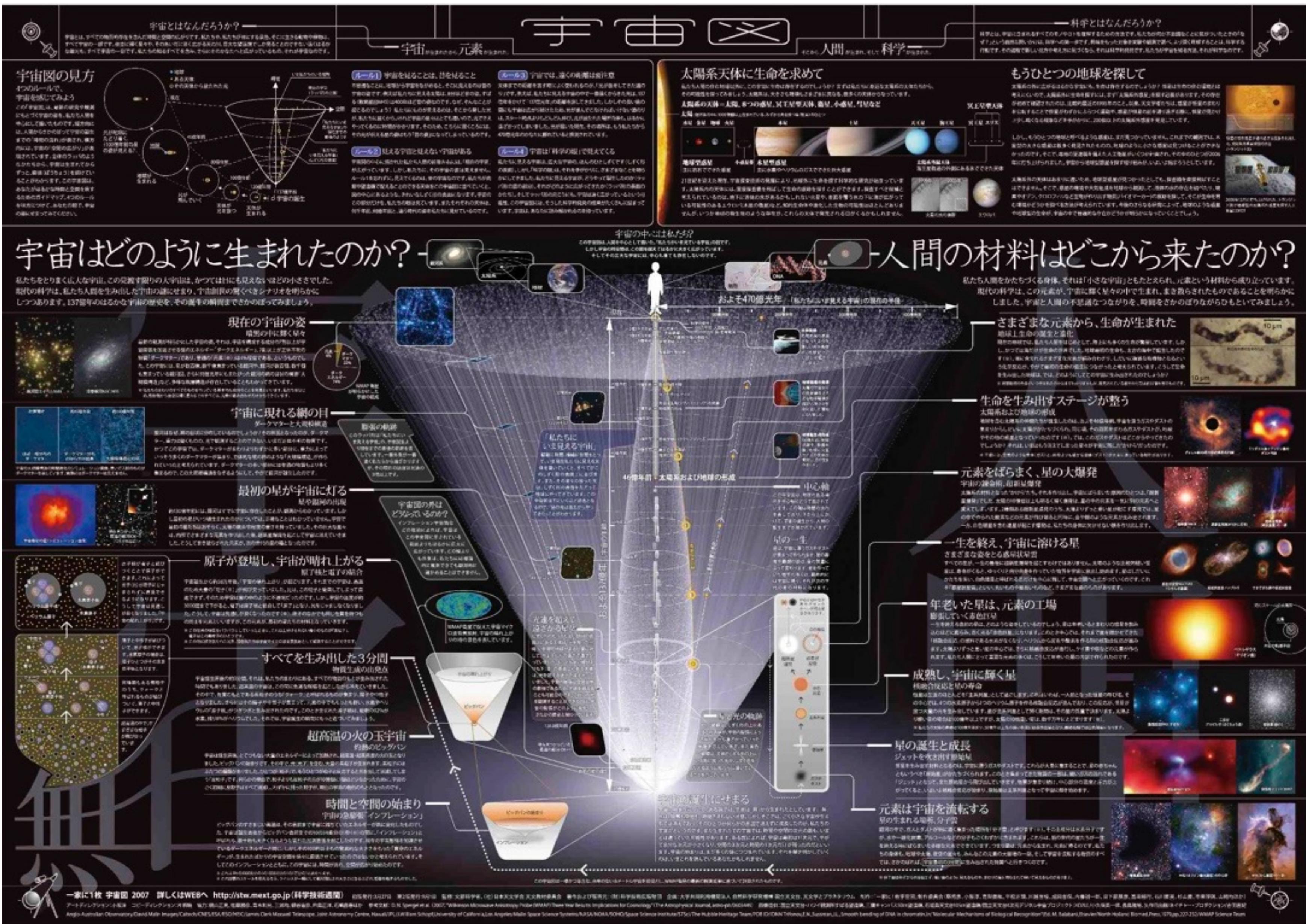


図 5.18 ビッグバン宇宙モデルの概略図。時間の進み方を上向き、空間の広がりを横軸にして示す。現在の私たちとは図の上の中央部分にいる。宇宙誕生直後にはインフレーションと呼ばれる急膨張を起こす。インフレーション後に高温高密度の火の玉宇宙が出現する。38万年後に光が直進できるようになる。電磁波では、この時点以降の観測が可能になる。最近では、宇宙は加速膨張をしていることが明らかになった。宇宙が広がる様子が示されているが、実際に私たちが見られる宇宙は、中央の涙のしずくの部分に限られる。

# 「一家に一枚 宇宙図」の見方

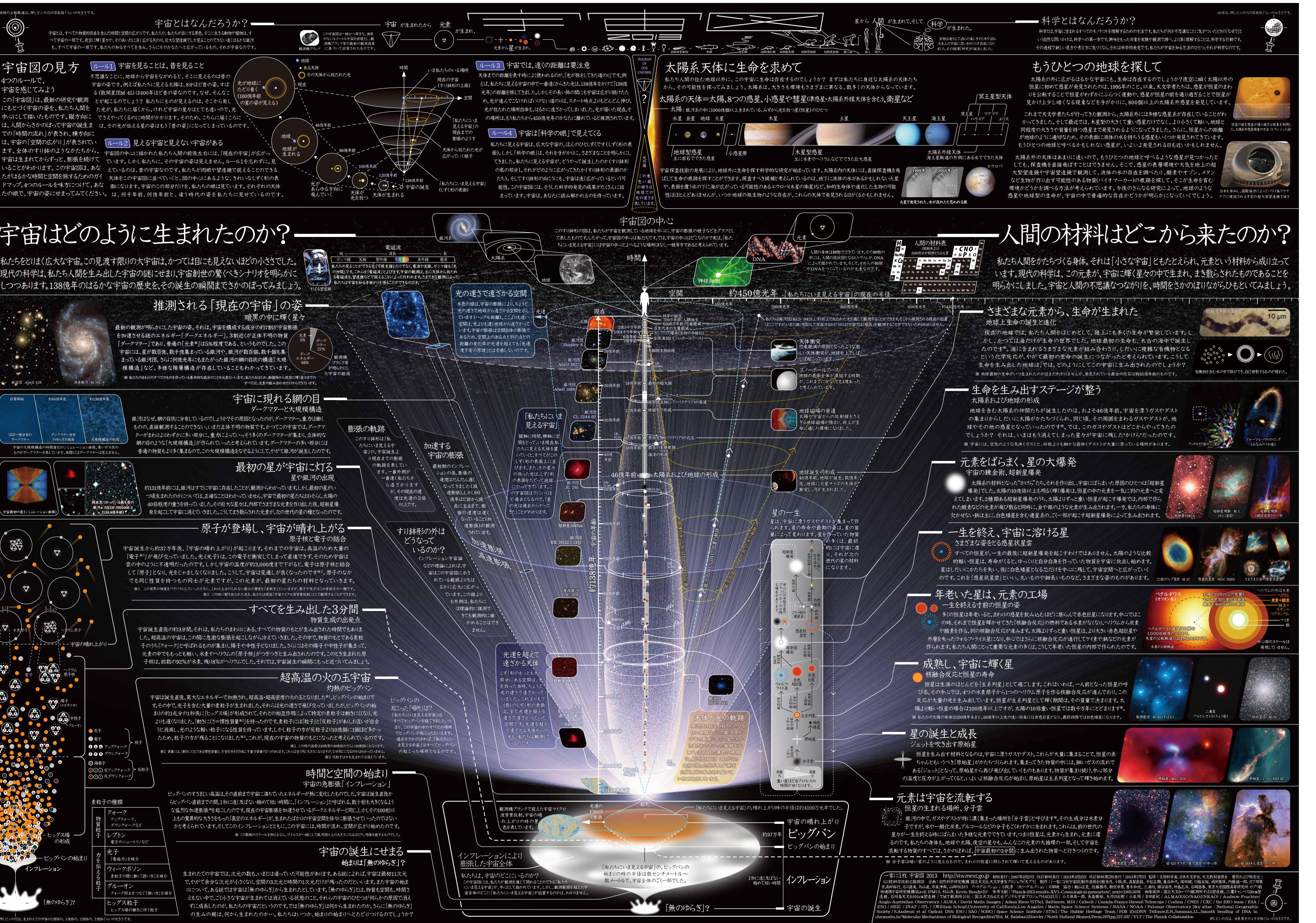


# 「一家に一枚 宇宙図」の変遷 : 2007年

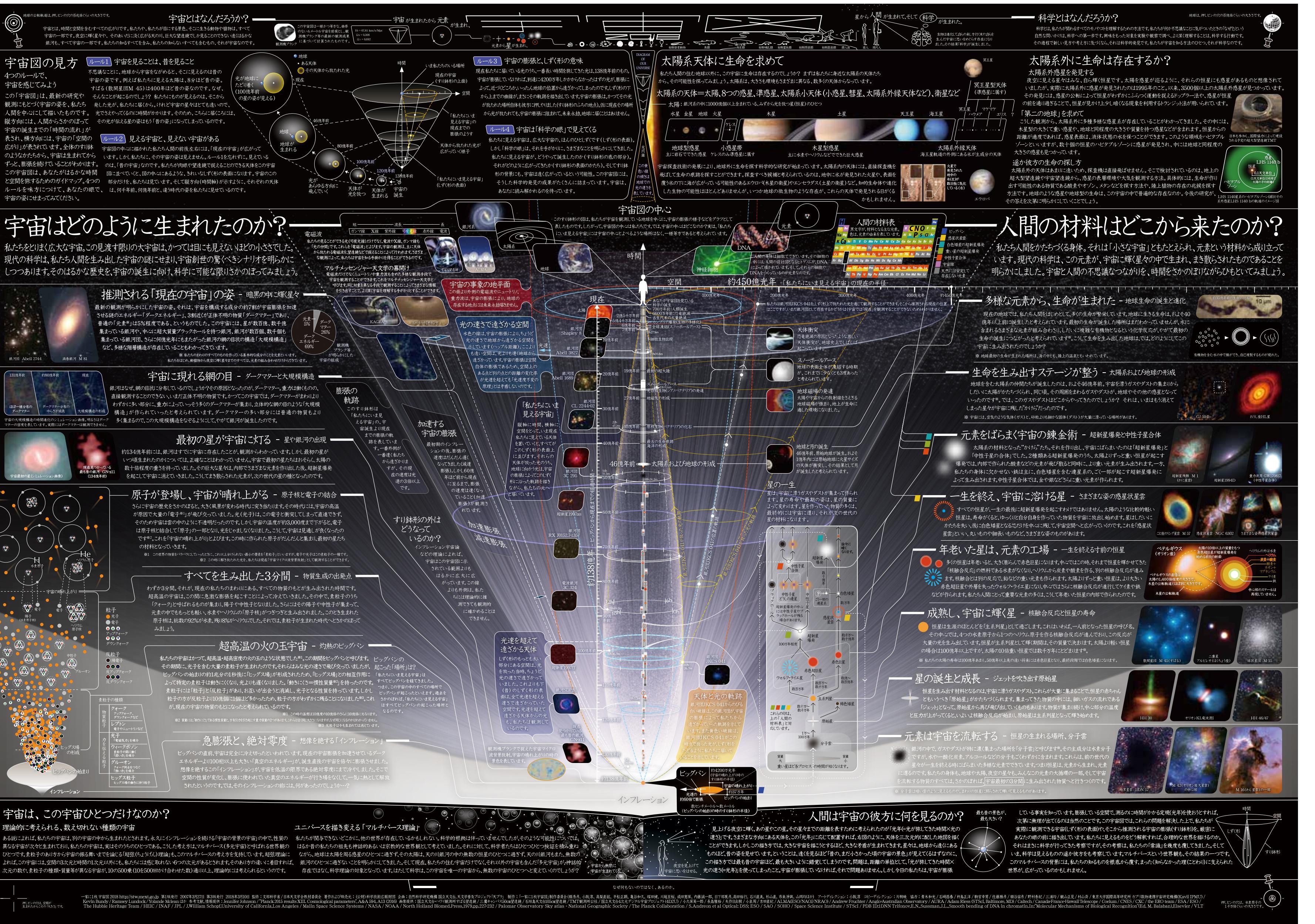


2007 version

# 「一家に一枚 宇宙図」の変遷 : 2013年



# 「一家に一枚 宇宙図」の変遷：2018年



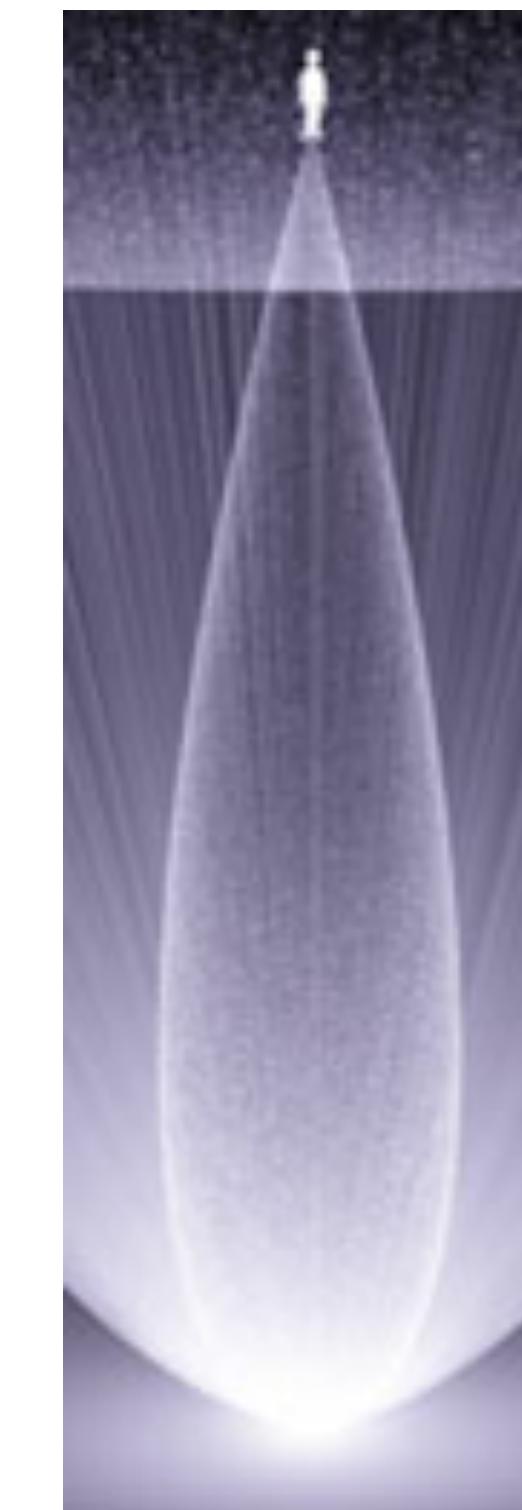
[www.nao.ac.jp/study/uchuzu2018/](http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu2018/)

2018 version



# 「一家に一枚 宇宙図」の見方

ルール1 宇宙を見ることは、昔を見ること  
太陽は、8分ほど昔の姿。すばる（散開星団M45）は400年ほど昔の姿。遠くを見るほど、過去の姿をみている。



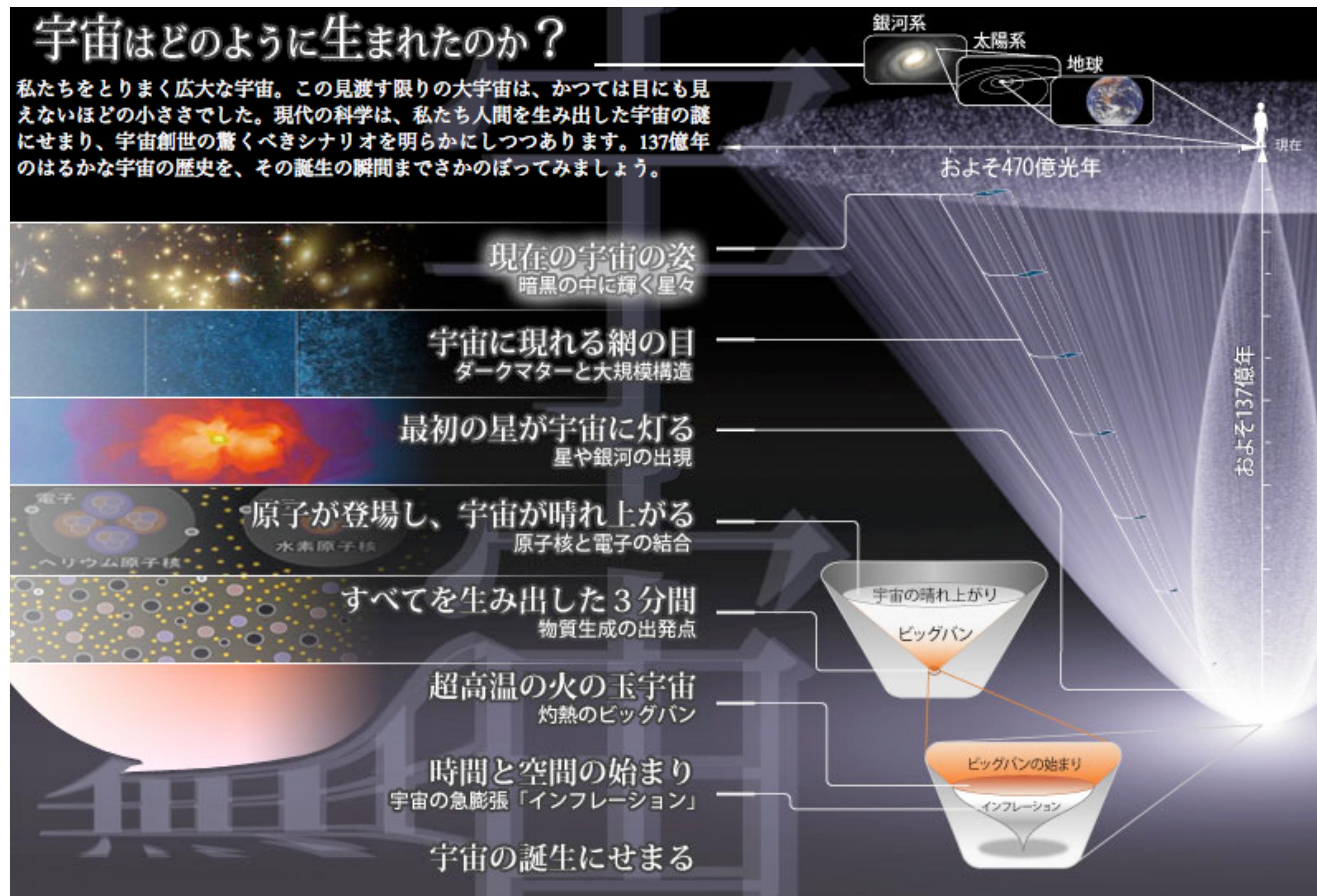
ルール2 見える宇宙と見えない宇宙がある  
我々は「現在の宇宙」を見ることはできない。見えるのは、中央の「しづく」の部分。

ルール3 宇宙では、遠くの距離は要注意  
我々が見える一番遠くからきた光は、「137億光年」先。しかし、そのときに放たれた光源は、宇宙膨張によって、470億光年のかなた。

私たちに見える宇宙=しづく形の表面。

宇宙がどうやって誕生したのか = ラッパ形の底の部分がどうなっているのか。  
宇宙がどのように広がってきたか = ラッパ形の表面の形はどうなっているのか。  
宇宙は我々の宇宙だけか = ラッパ形の向こうにも宇宙はあるのか。

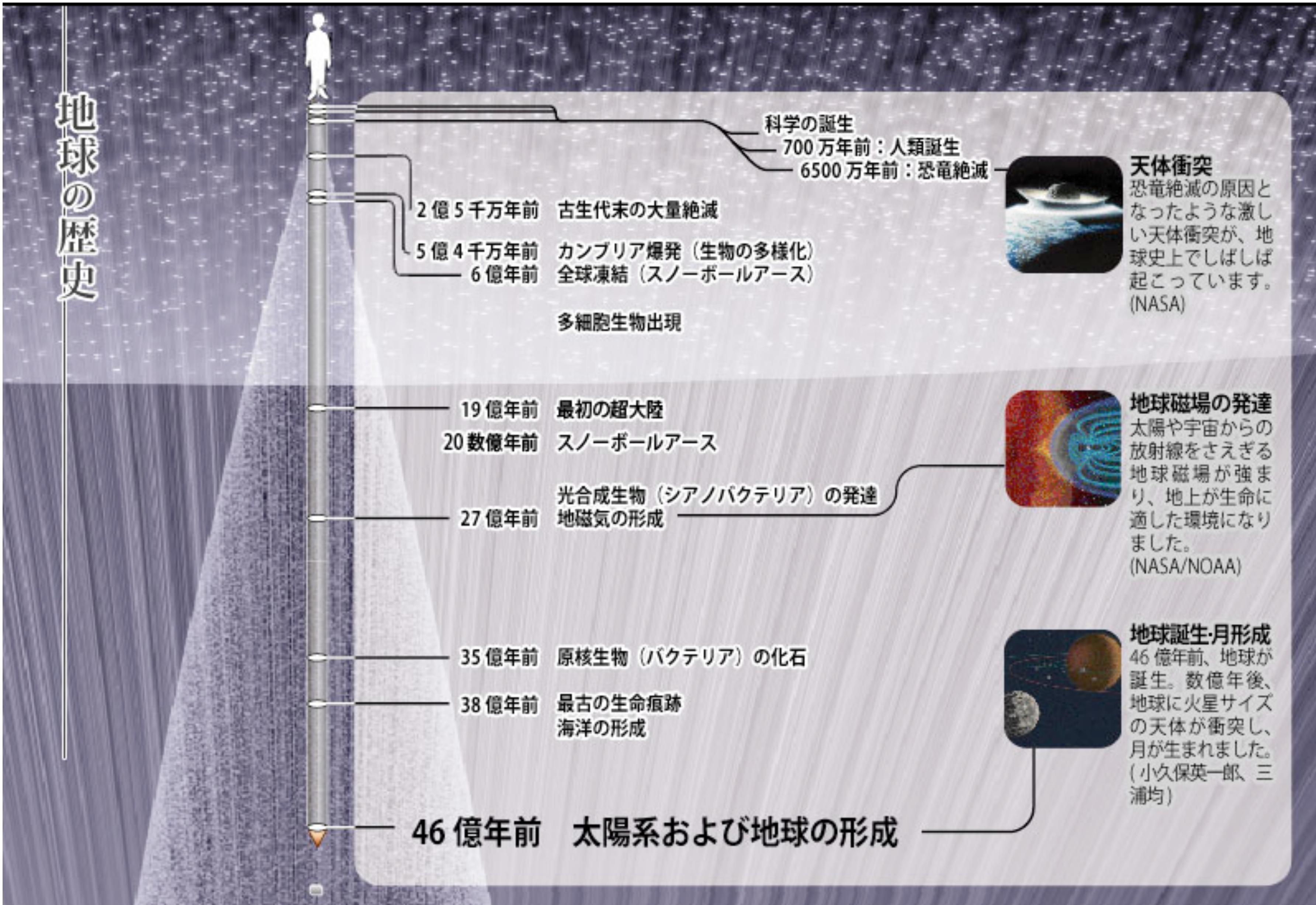
# 「一家に一枚 宇宙図」の見方



# 「一家に一枚 宇宙図」の見方



# 「一家に一枚 宇宙図」の見方



# 第5章 宇宙論

## 5.1 宇宙が膨張しているとわかるまで 一般相対性理論による膨張宇宙の予言

1929年 ハッブル・ルメートルの宇宙膨張の発見

## 5.2 ビッグバン宇宙論

火の玉宇宙論と定常宇宙論

1965年の宇宙背景放射の発見

## 5.3 インフレーション宇宙モデル

1981年, 佐藤勝彦とグースが独立に提唱

ほぼ確定か? 2014年3月のニュースは誤報だった.

# 火の玉宇宙論の誕生



ガモフ

1946年, ガモフ, 「宇宙が高温高密度の火の玉の状態だったときに, 短時間で元素が合成されていった」

1948年,  $\alpha \beta \gamma$ , 「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で, すべての元素がつくられる」

宇宙膨張が本当なら, 過去は小さな宇宙だったはず。宇宙のはじまりは, すべての物質とエネルギーが集まり, 非常に高温で高密度の状態だったことになる。

## The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER\*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,  
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

*Cornell University, Ithaca, New York*

AND

G. GAMOW

*The George Washington University, Washington, D. C.*

February 18, 1948

As pointed out by one of us,<sup>1</sup> various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas

# 林忠四郎 (1920-2010)



NASA G-68-10,414

1948年,  $\alpha \beta \gamma$ , 「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で, すべての元素がつくられる」

**ビッグバン理論 =  $\alpha \beta \gamma$ -Hayashi の理論  
『元素合成ははじめの3分間で終了』**

## 星の進化

恒星が主系列星となる前に, 温度がほぼ一定のまま収縮する時期があることを明らかにした(林フェイズ, 林トラック).

恒星に対する最大半径の制約(林の限界線).

## 太陽系形成モデル

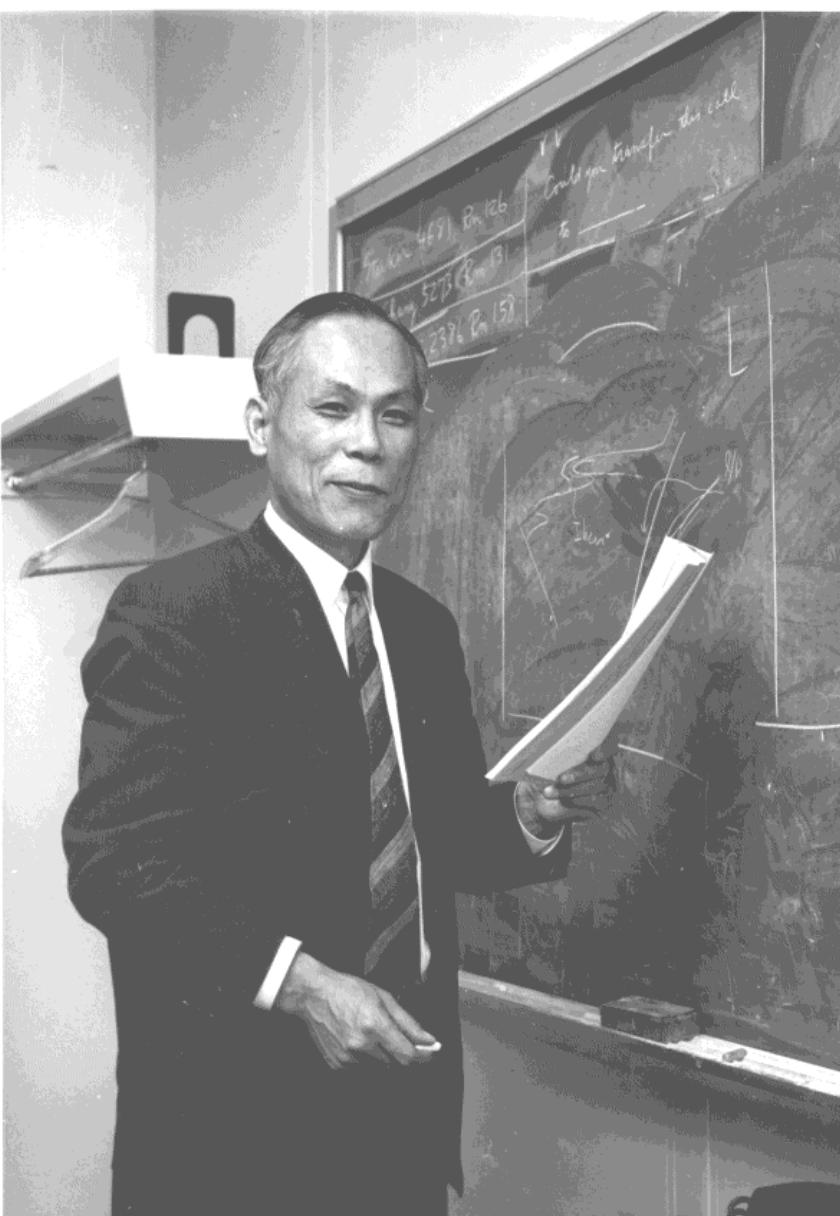
恒星・惑星系の全形成過程をモデル化した(京都モデル, 標準モデル)

# 日本の宇宙物理学は林忠四郎から始まった

**湯川秀樹 (1907-1981)**

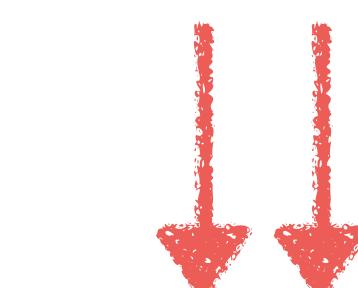
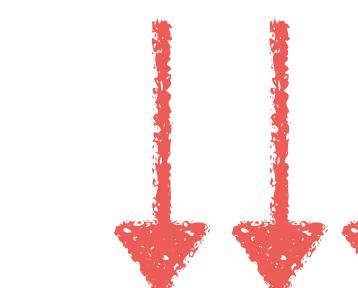
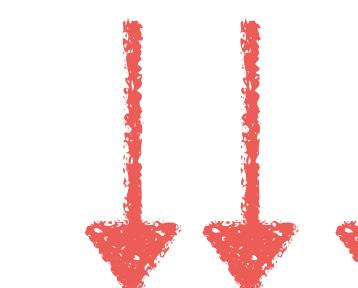
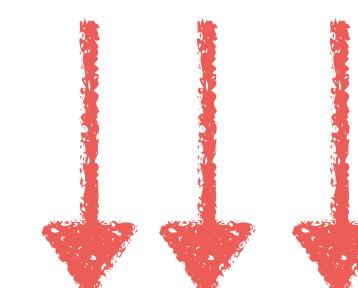
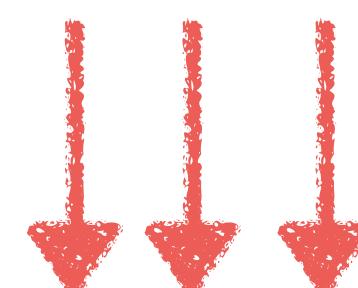


**林忠四郎 (1920-2010)**

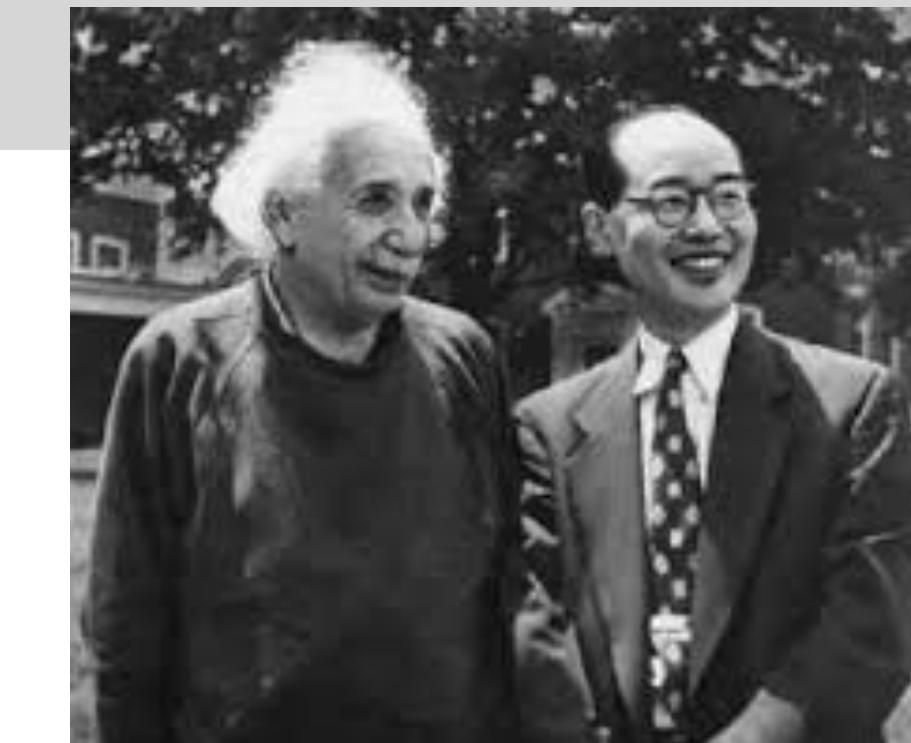


NASA G-68-10,414

**佐藤文隆, 佐藤勝彦, 中村卓史, 前田恵一, 佐々木節. . .**



**真貝**



## 講師

**真貝 寿明 (しんかい ひさあき) 氏**

大阪工業大学 情報科学部 情報システム学科 教授、武庫川女子大学 非常勤講師、理化学研究所 客員研究員。主な研究分野は一般相対性理論・宇宙論。研究者としては湯川秀樹博士の曾孫弟子にあたる。最近の研究は、高次元ワームホール、修正重力理論のダイナミクスなど。

平成27年度は、西宮市宮水学園マスター講座「日常は物理で満ちている」を担当した。一般向けでは、ボランティア団体『てんもんぶ』の組織員として、天体観望会やプラネタリウム解説などを行っている。



# 火の玉宇宙論 vs 定常宇宙論

1948年,  $\alpha \beta \gamma$ , 「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で, すべての元素がつくられる」

1950年, 林, 「はじめの3分間で軽元素がつくられる」

しかし,

当時の観測データからは, 宇宙年齢は18億年  
vs 地球の岩石からは, 地球年齢は30億年

定常宇宙論

「宇宙に始まりも終わりもない」



Fred Hoyle  
(1915–2001)

~~火の玉宇宙論~~ vs 定常宇宙論

## ビッグバン宇宙論

「宇宙には始まりがあった」

宇宙誕生後、3分で軽元素の合成が  
された

「宇宙に始まりも終わりもない」

宇宙膨張をしても新たに物質が  
生成していれば大丈夫



ガモフ

彼らは宇宙が大きな爆発(ビッグバン)  
から始まったと言っている

ビッグバン、いい名前だ。  
ビッグバン宇宙論、と呼ぶことにしよう



ホイル

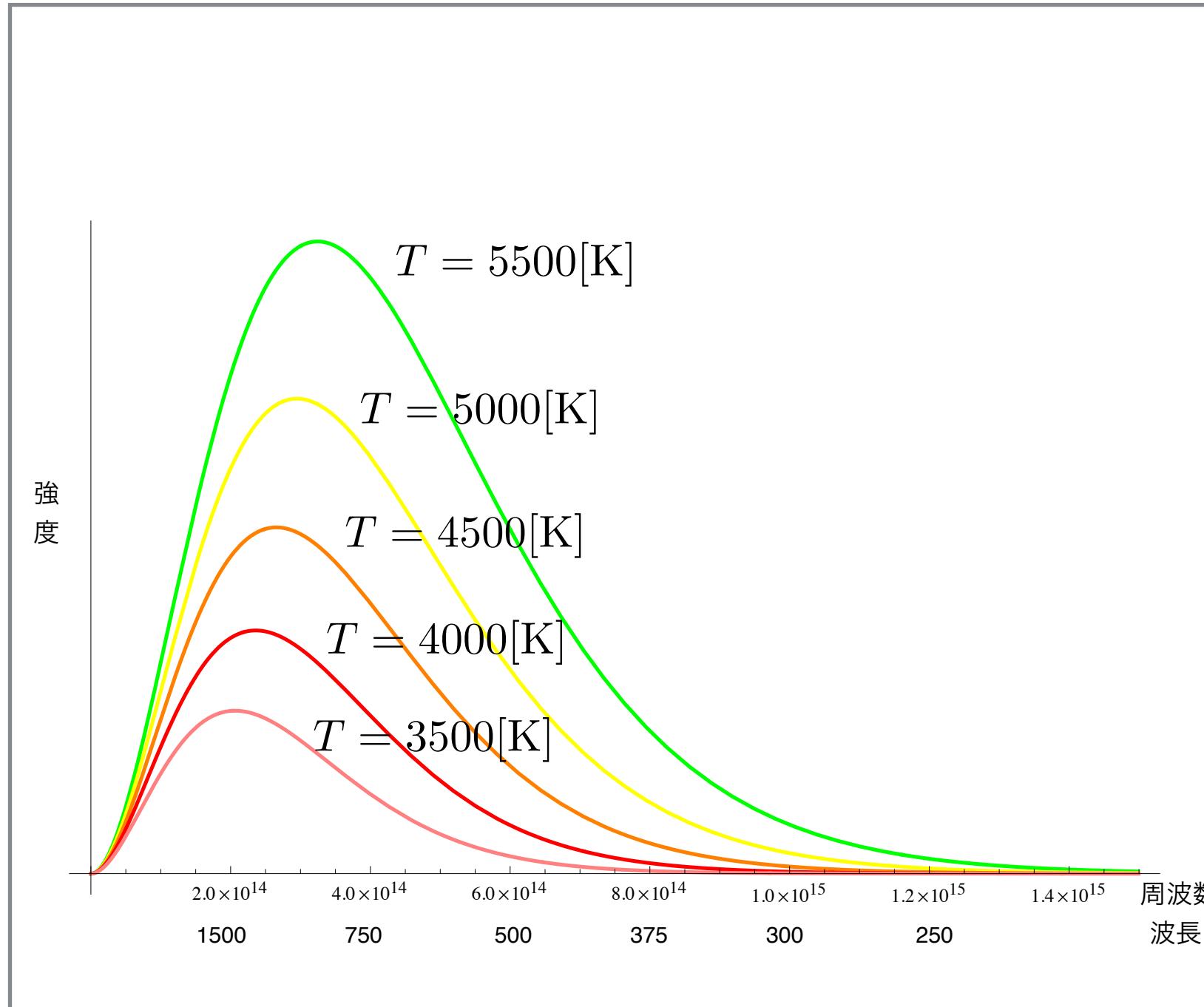
# ビッグバン宇宙論 vs 定常宇宙論

表 5.1 ビッグバン宇宙モデルと定常宇宙モデルの比較.

	ビッグバン宇宙モデル	定常宇宙モデル
宇宙膨張	宇宙全体が 1 点からはじまり、膨張を続けている。過去は高温高密度の火の玉だったが、現在は膨張のため、温度が低下した。	膨張を続けているが、物質生成がつねに行われているので、宇宙の物質密度は一定である。宇宙の姿は、過去も現在も不变である。
宇宙マイクロ波背景放射	過去の火の玉宇宙の名残りとして 5K ~ 7K で存在するはずだ。	存在する必要はない。
元素の存在比	元素合成の理論から、軽元素 (H, He) の存在比は説明できた。それ以外はまだできていない。	(説明せず)
宇宙年齢	宇宙膨張を観測することによって、宇宙年齢が決まる。	宇宙は大局的に不变なので、宇宙年齢を考える必要はない。
宇宙誕生	宇宙はある時刻にはじまった。しかし、そのメカニズムを説明できない。	議論する必要はない。

# 宇宙マイクロ波背景輻射

Cosmological Microwave Background Radiation (CMB)



## 黒体放射(黒体輻射)

= 物体は、温度に応じて  
熱を電磁波の形で放射する

過去に宇宙が高温だったら、  
その証拠の「放射」があるはず

宇宙誕生後、30万年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度(約3000K)が放射されて残っているはず。

宇宙膨張で温度下がって 5~7K (-268° ~ -266°)位

# 宇宙マイクロ波背景輐射の発見

Discovery of CMB



Arno A. Penzias (1933–)  
Robert W. Wilson (1936–)

ベル研究所, 電波通信の実験  
「どうしても取り除けないノイズがある」  
「昼夜によらず, 季節によらず, 方向によらないノイズがある」

1978年, ノーベル物理学賞受賞

宇宙誕生後, 30万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. その時の温度(約3000K)が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって

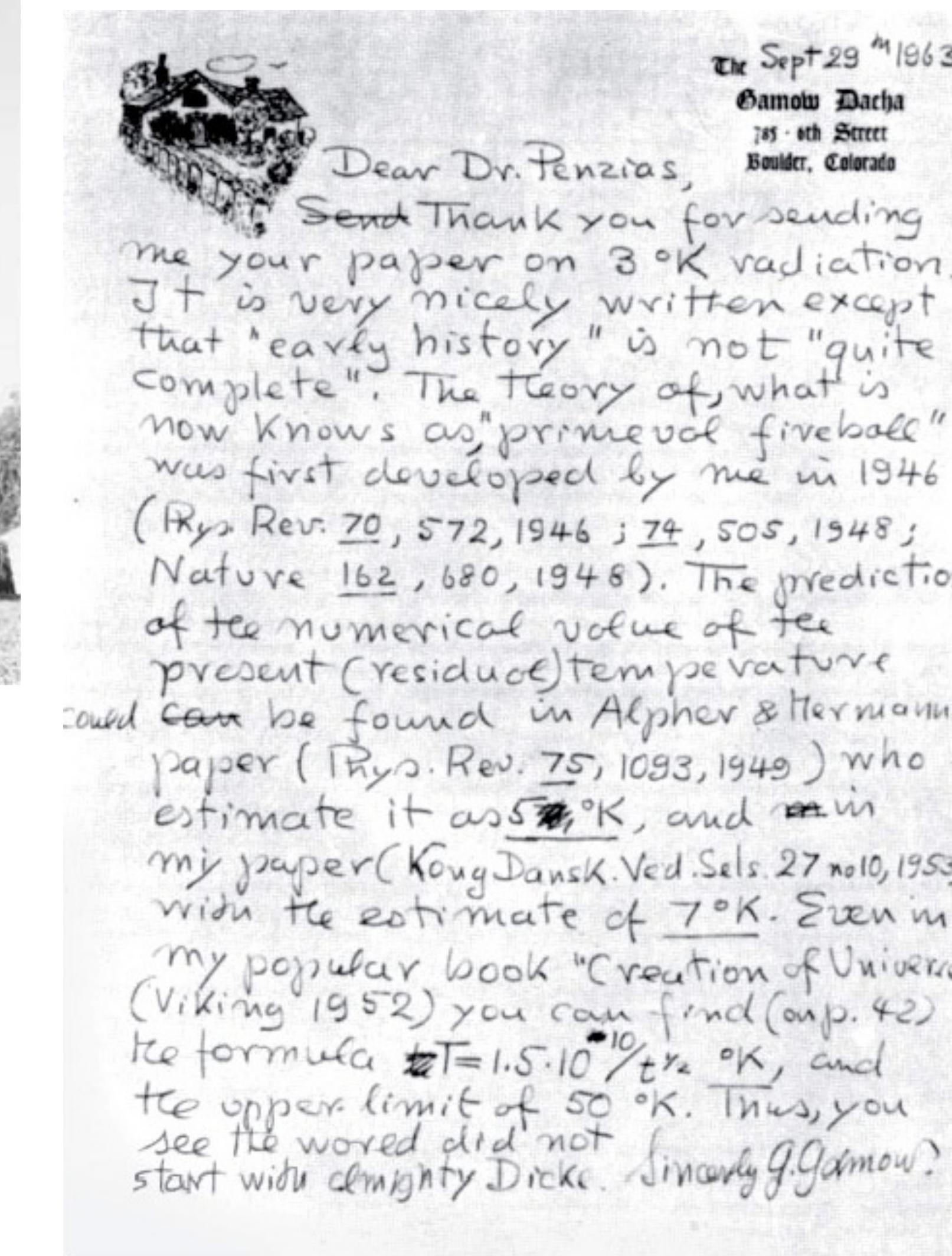
~~5~7K~~ (-268° ~ -266°)位  
**3.5K**

# 宇宙マイクロ波背景輐射の発見

Discovery of CMB

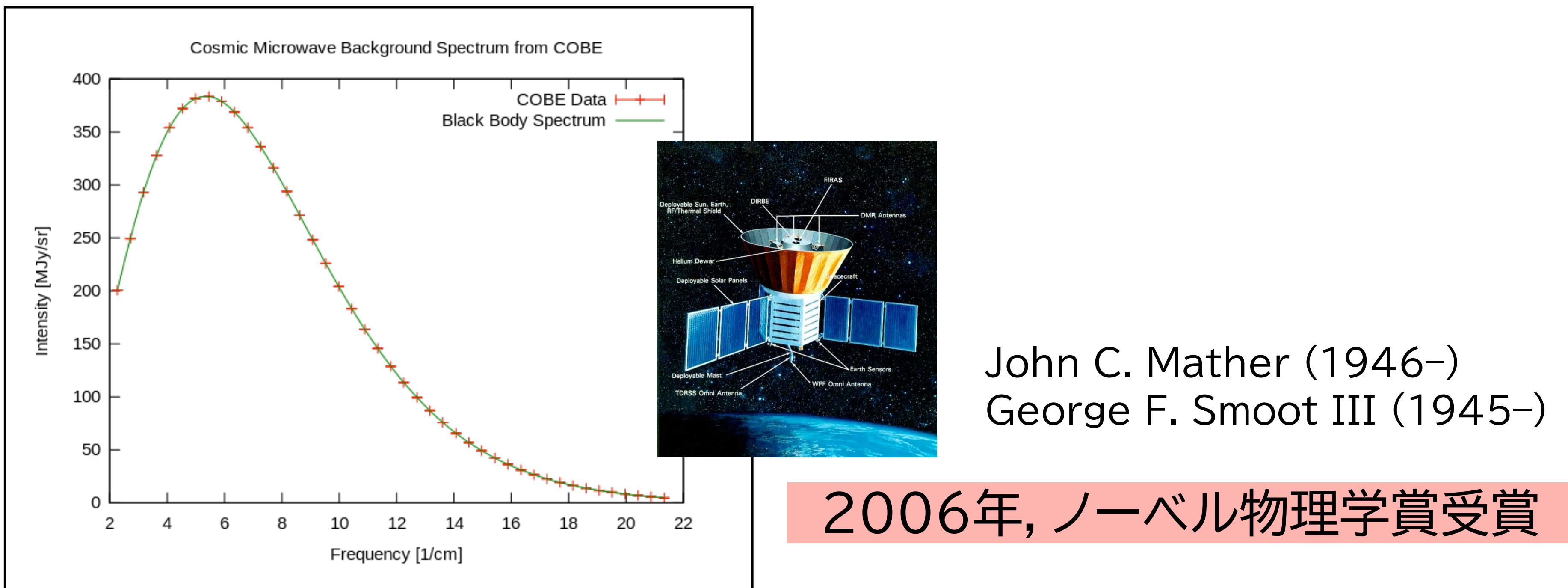


ガモフがペンジアスと  
ウィルソンに宛てた手紙



# COBE衛星によるCMBの測定

Cosmological Background Explorer, 1992



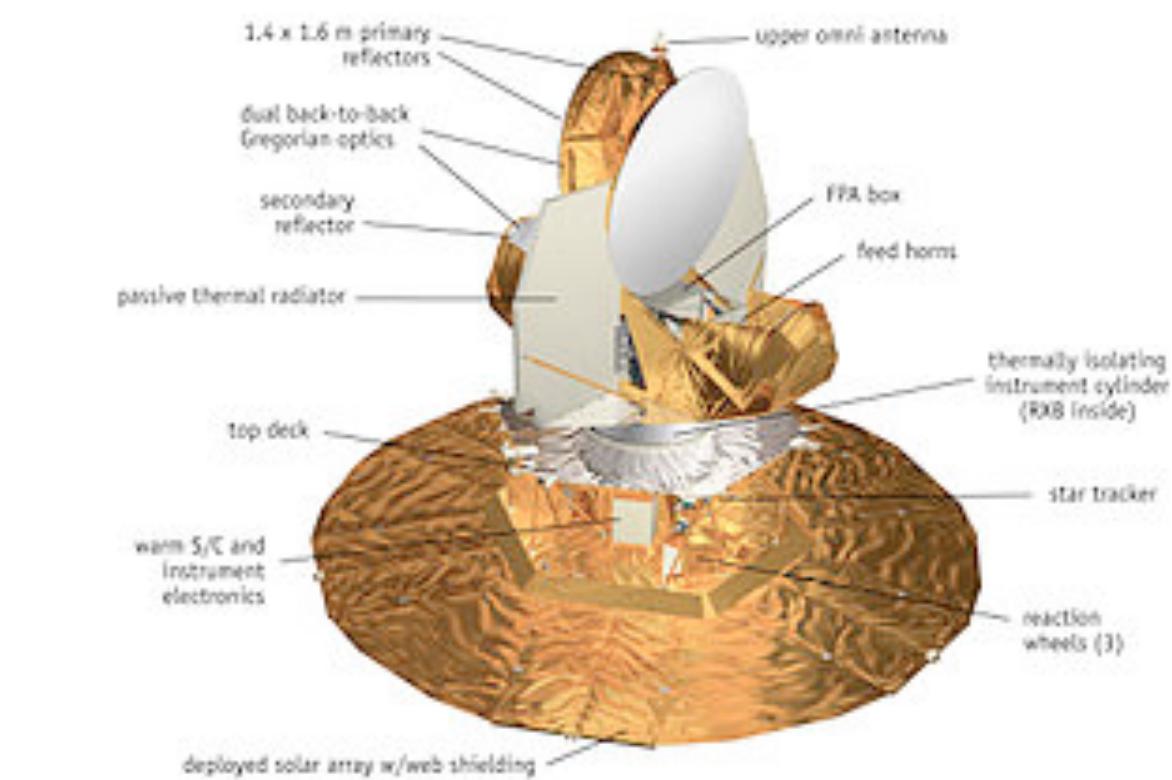
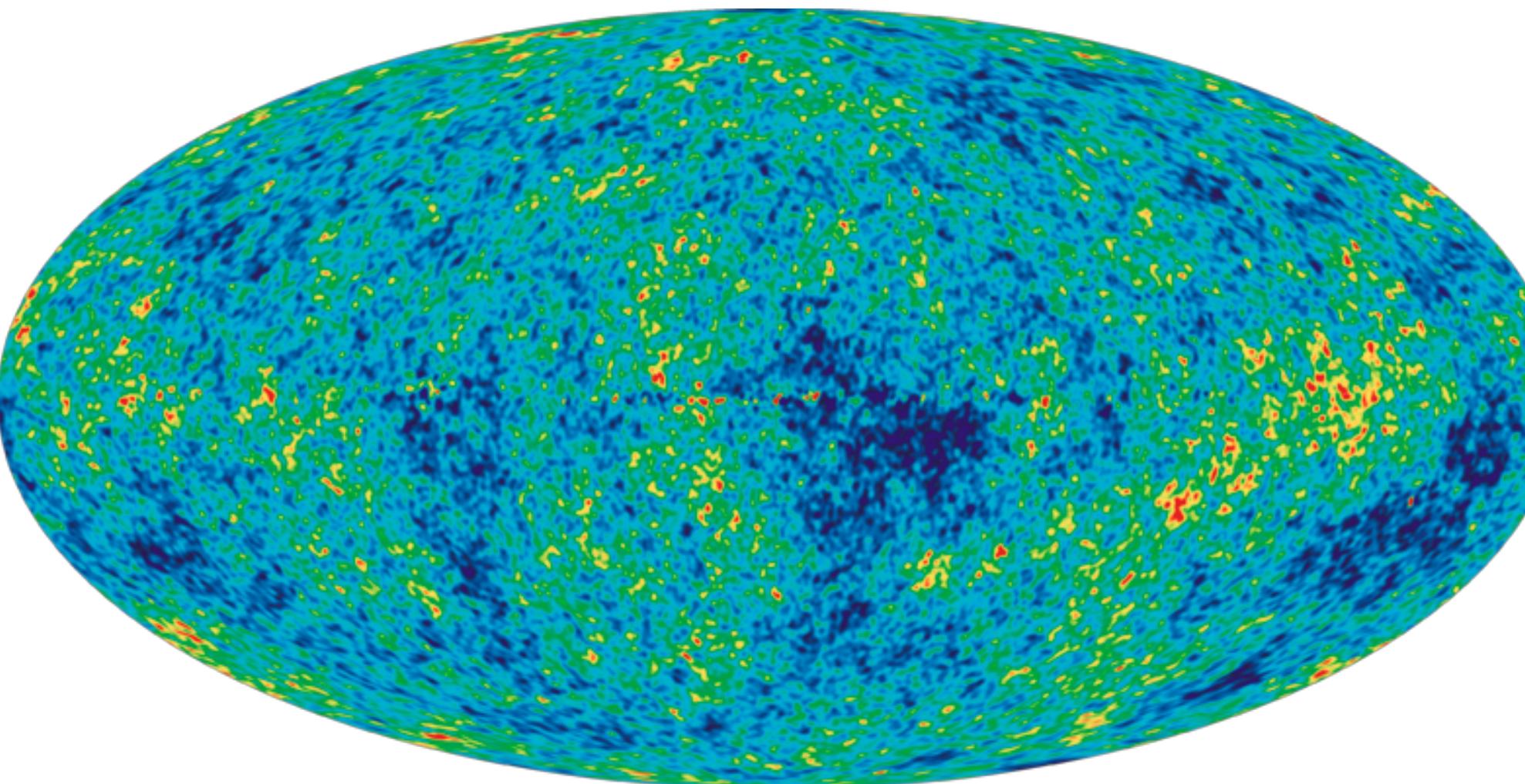
宇宙誕生後、30万年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度(約3000K)が放射されて残っているはず。

宇宙膨張で温度下がって

~~5~7K~~  
~~35K~~ 2.73 K

# WMAP衛星によるCMBの測定

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2002



37万9000年

宇宙の年齢は $137 \pm 1$ 億年, と報告

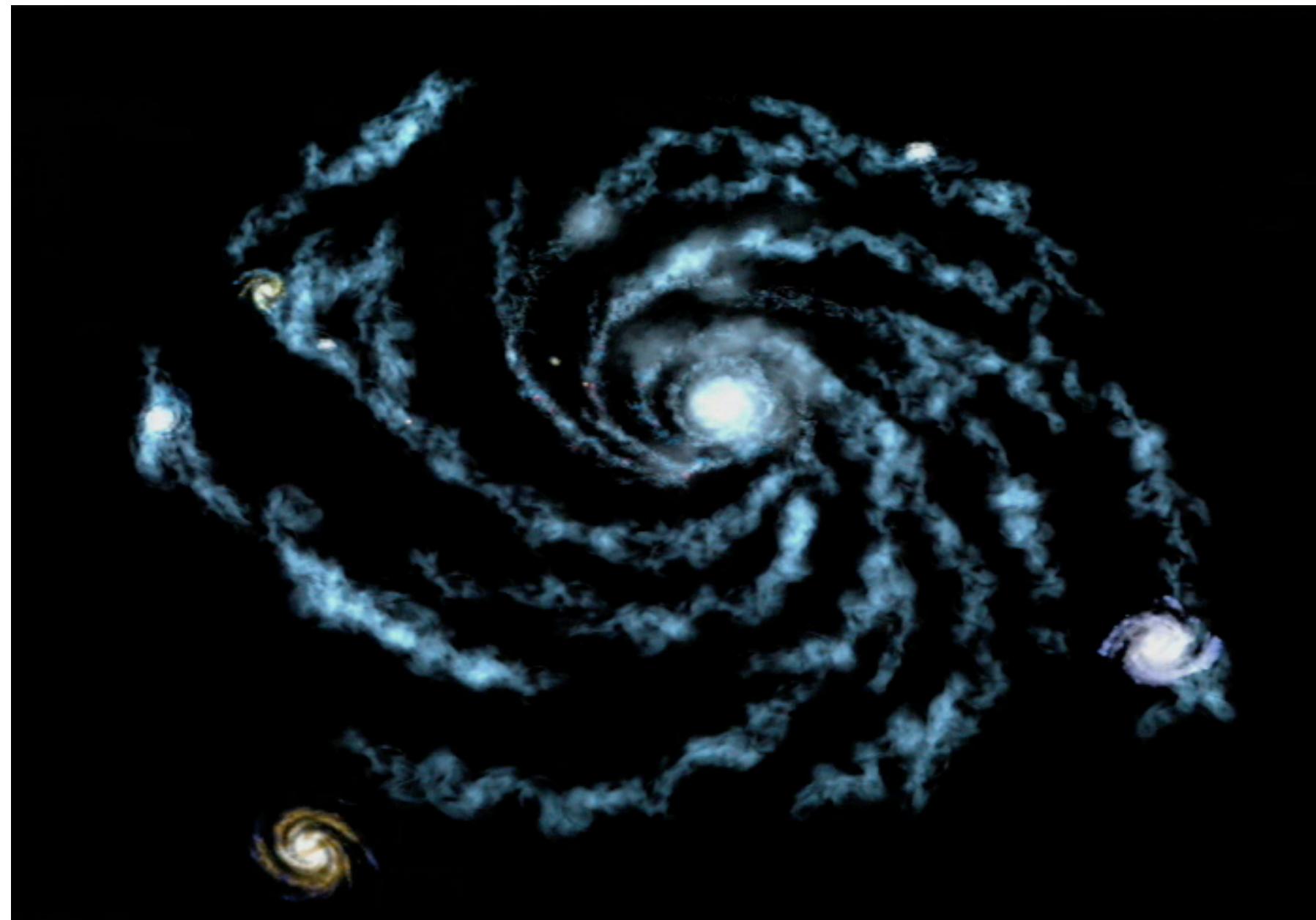
宇宙誕生後, ~~30~~万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. その時の温度(約3000K)が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって

~~5~7K~~ ~~3.5K~~ ~~2.73 K~~ **2.725K**

# WMAP衛星によるCMBの測定

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2002



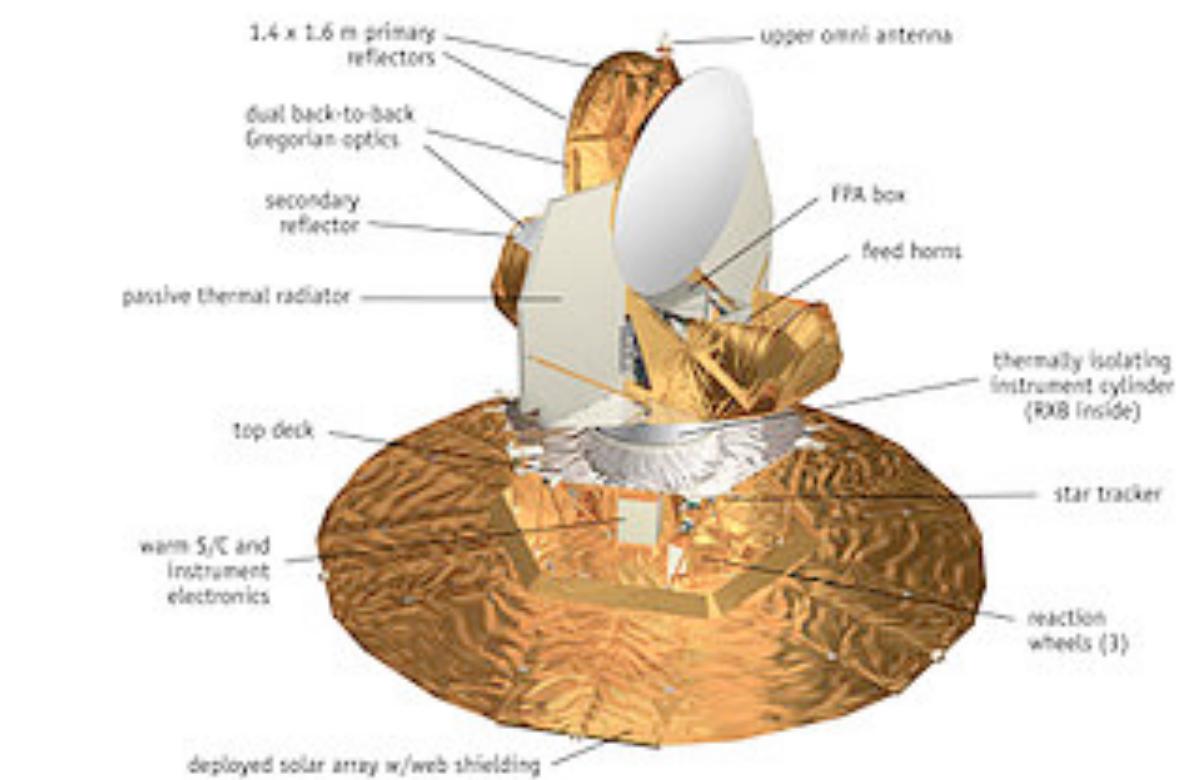
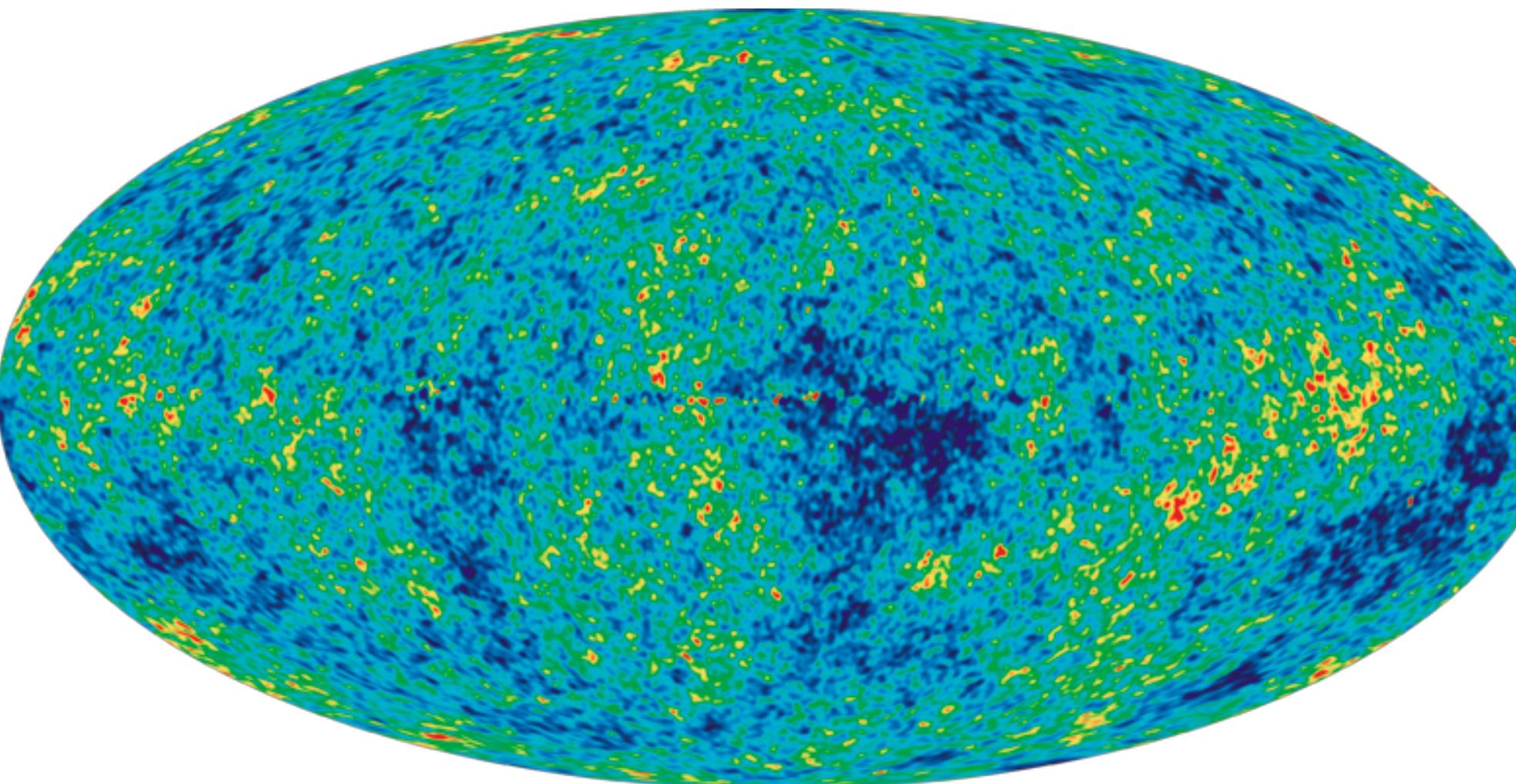
- The mean temperature of photons in the Universe today is 2.725 K
- WMAP is capable of measuring the temperature contrast down to better than **one part in millionth**



小松英一郎氏のviewgraphより

# WMAP衛星によるCMBの測定

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2002



**37万9000年**

宇宙の年齢は $137 \pm 1$ 億年, と報告

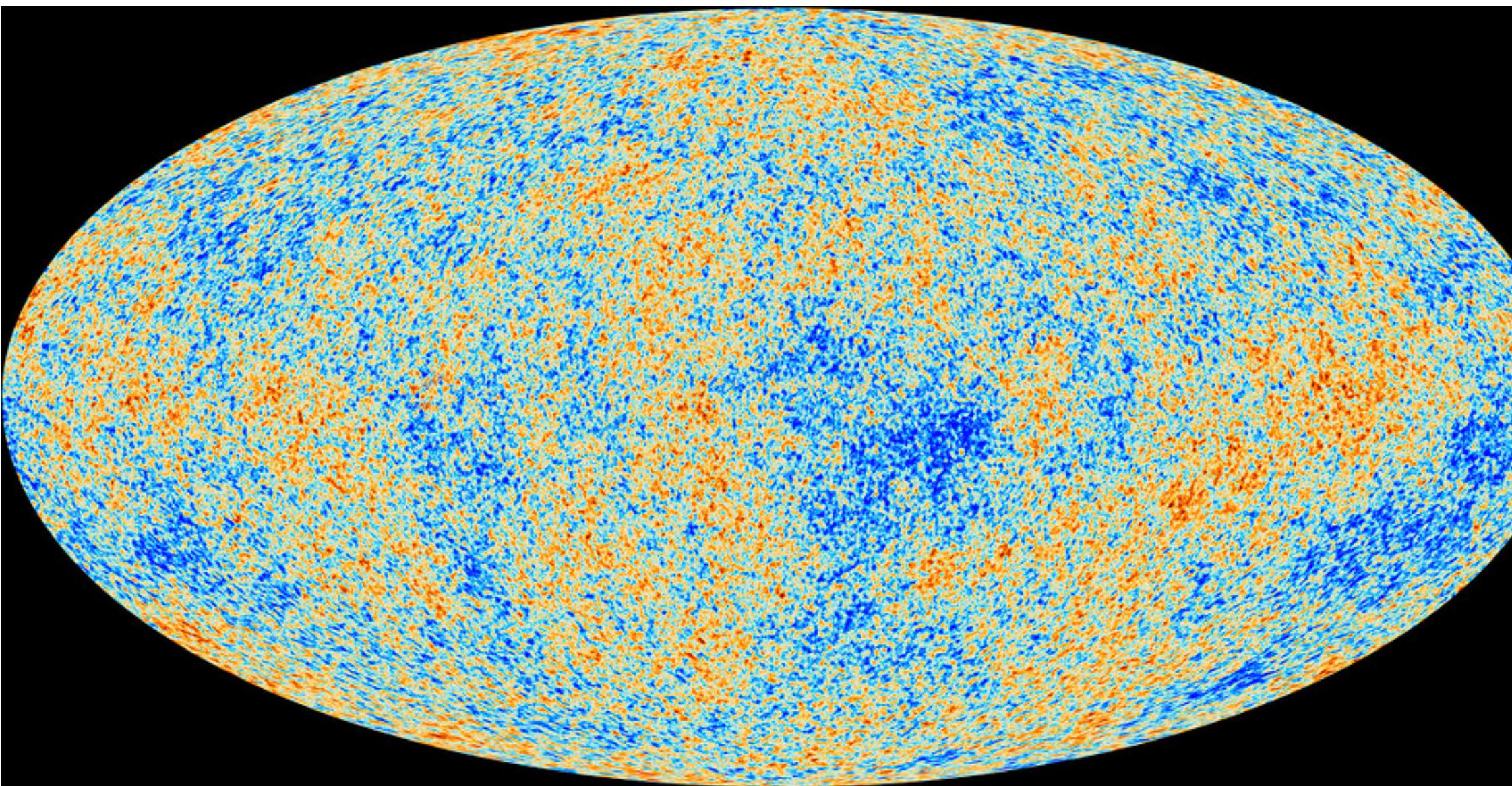
宇宙誕生後, ~~30~~万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. その時の温度(約3000K)が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって

~~5~7K~~ ~~3.5K~~ ~~2.73 K~~ **2.725K**

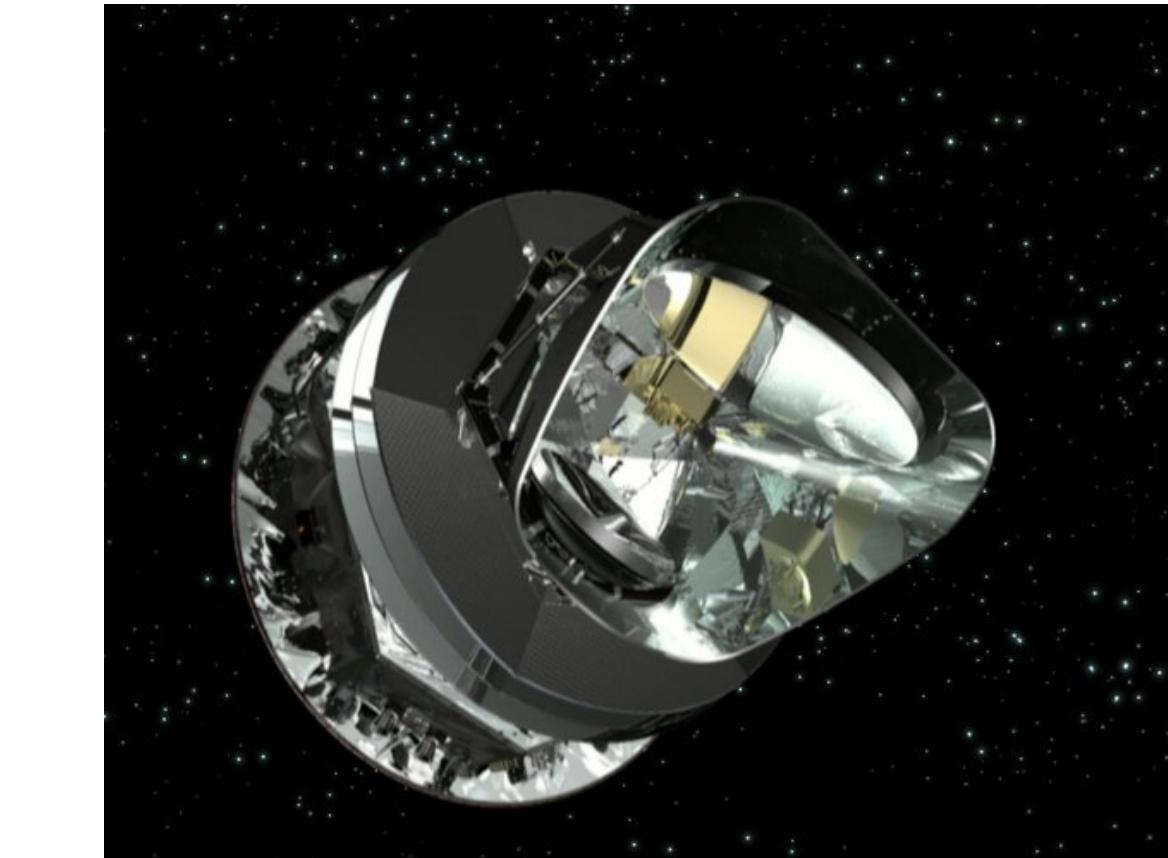
# Planck衛星によるCMBの測定

Planck, 2013



38万年

宇宙の年齢は $138 \pm 0.5$ 億年, と報告

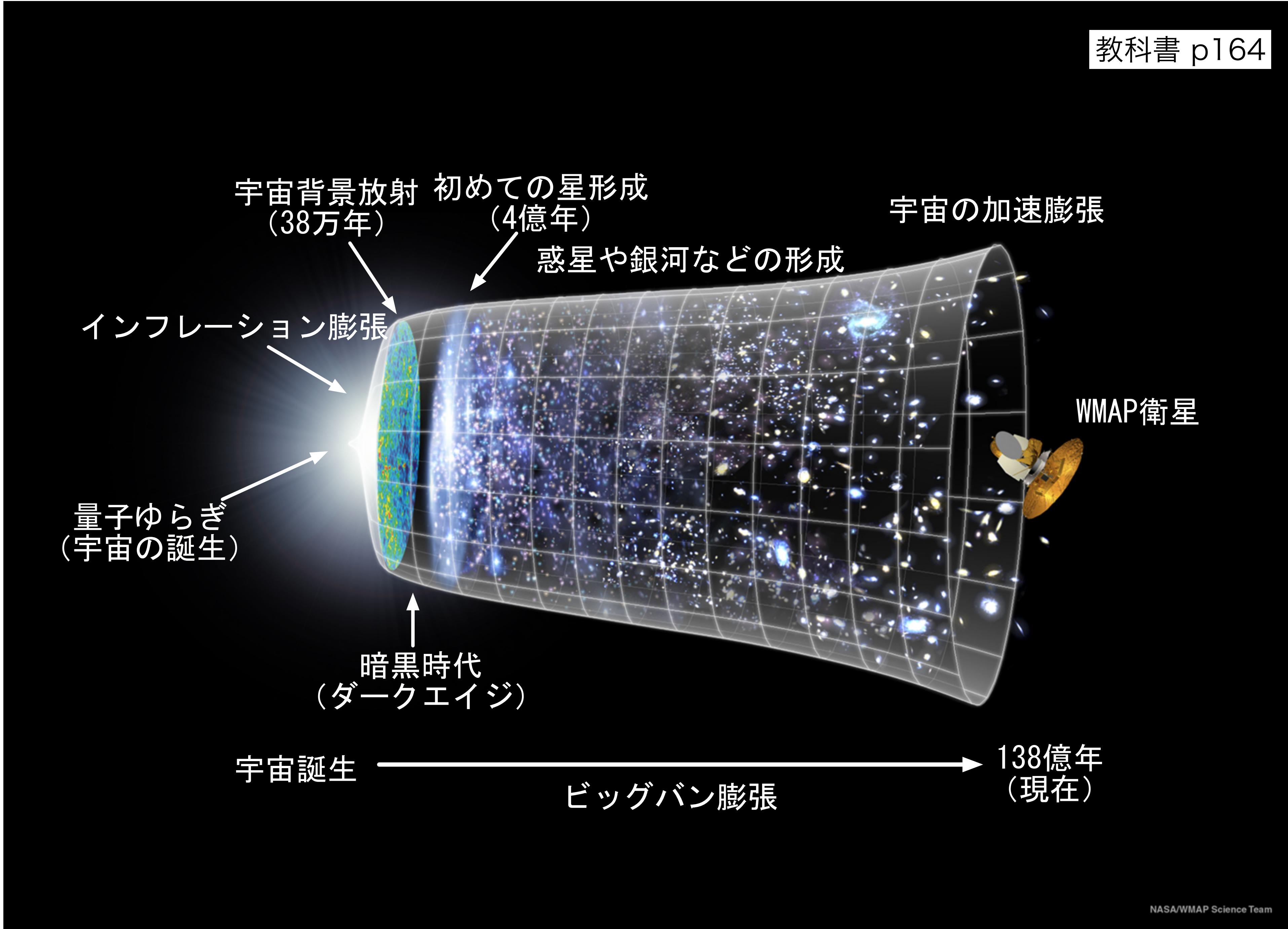


宇宙誕生後, ~~37~~万9000年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度(約3000K)が放射されて残っているはず。

宇宙膨張で温度下がって

~~2.725~~K (-270°)位

**$2.72548 \pm 0.00057$  K**



## 標準ビッグバンモデル：まとめ

### (1) 宇宙膨張の発見 (1929)

遠くの銀河は私たちの銀河からの距離に比例した速度で一様に遠ざかっている。

### (2) 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の発見 (1964)

等方的に、かつて宇宙が高温だったことを示すマイクロ波が観測された。

### (3) He, 重水素の存在比の観測

初期宇宙の熱核反応で、陽子と中性子から生成されると考えられる He と重水素の存在比が、星間空間で観測される値とほぼ一致した。

標準ビッグバン宇宙論は正しい

# 第5章 宇宙論

## 5.1 宇宙が膨張しているとわかるまで 一般相対性理論による膨張宇宙の予言

1929年 ハッブル・ルメートルの宇宙膨張の発見

## 5.2 ビッグバン宇宙論

火の玉宇宙論と定常宇宙論

1965年の宇宙背景放射の発見

## 5.3 インフレーション宇宙モデル

1981年, 佐藤勝彦とグースが独立に提唱

ほぼ確定か? 2014年3月のニュースは誤報だった.

# ビッグバン宇宙モデルの問題点

- (A) 地平線問題. なぜ、CMB は全天で一様に近い温度分布を示すのか.
- (B) 平坦性問題. なぜ、現在の宇宙は平坦（曲率が 0）に見えるのか.
- (C) 構造形成の種問題. 星や銀河など物質ができるためのゆらぎはどうやって生まれたのか.
- (D) モノポール問題. 宇宙初期の相転移で生じる位相欠陥のうち、とくにモノポールはどのように消滅していくのか.
- (E) バリオン数生成の問題. なぜ、宇宙には物質だけ存在して反物質が存在しないのか.
- (F) 宇宙の初期特異点問題. 時刻 0 のとき、宇宙は密度が無限大の特異点になる。物理的にどうやって説明するのか.
- (G) 時空の次元問題. 私たちの住む時空は、なぜ、4 次元であって 3 次元や 5 次元でないのか.

12月14日～15日

# ふたご座流星群

- ★2025年は条件**最良**
- ★1時間に60個！  
(昨年予報は、30個/時間)



<https://www.astron.pref.gunma.jp/events/091213geminids.html>



<https://mirahouse.jp/begin/constellation/Gemini.html>

# 今日のミニツツペーパー記入項目

出席票を兼ねます。

- 【12-1】AINシュタインが自ら「生涯最大のひらめき」と称したもののは何か。(以前に説明)
- 【12-2】AINシュタインが「生涯最大の誤り」と語ったもののは何か。(本日説明)
- 【12-3】ビッグバンの命名者は誰か。
- 【12-4】通信欄。(感想、講義で取り上げて欲しい疑問・要望・連絡事項など、何かあれば)