

素粒子物理学と物質の起源

佐賀大学工学部物理科学科

船久保 公一

素粒子って何？

物質を構成する最小要素

- どこまでわかっているのか？
- 物質はどこからきたのか？
- 素粒子と宇宙との関わりは？



3人の業績はこれらの問題に密接に関係しています

物質をつくっているもの



1m

原子

O

H

N

C

Ca

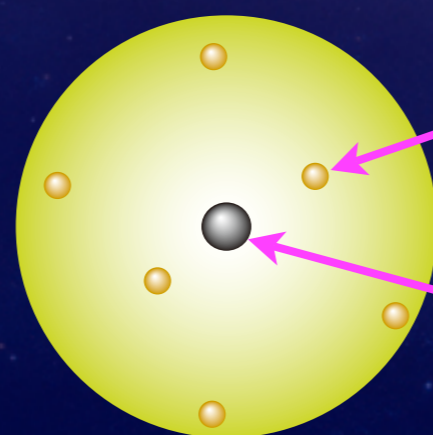
Si

Fe

$10^{-10} \sim 10^{-9} \text{m}$

$$1\text{mm} = \frac{1}{1000} \text{m} = 10^{-3} \text{m}$$

電磁相互作用
(静電気力)



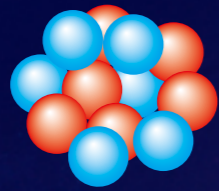
電子

マイナスの電荷

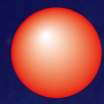
原子核

プラスの電荷

● **電子**：大きさは無い(現在の実験では)



原子核 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{m}$



陽子 プラスの電荷



中性子 電荷無し



10^{-15}m

陽子・中性子から原子核を作る力

強い相互作用

電磁相互作用より桁外れに強い

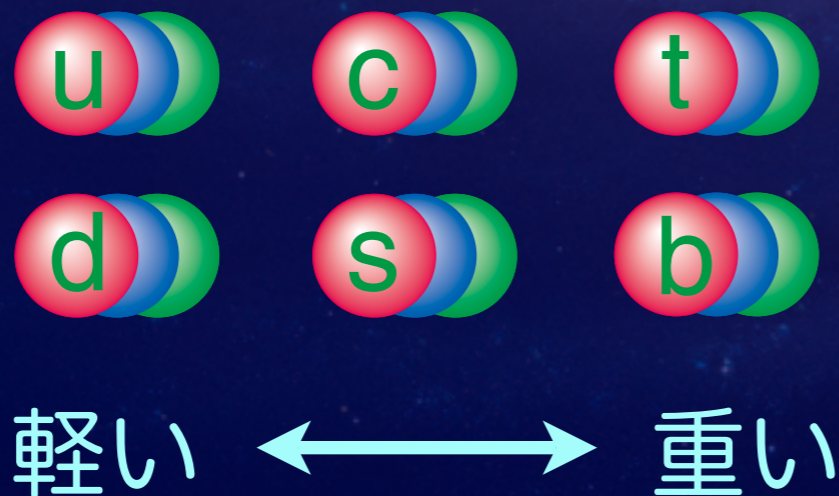
結合エネルギーは原子の100万倍



強い相互作用をする粒子の仲間 **ハドロン**

陽子よりずっと重いハドロン ← 重いクォーク

現在までに **6種類**発見



重い粒子は加速器で生成
軽い粒子に崩壊

強い相互作用をしない粒子の仲間

レプトン

電子と同じ電荷



電子

ミュー

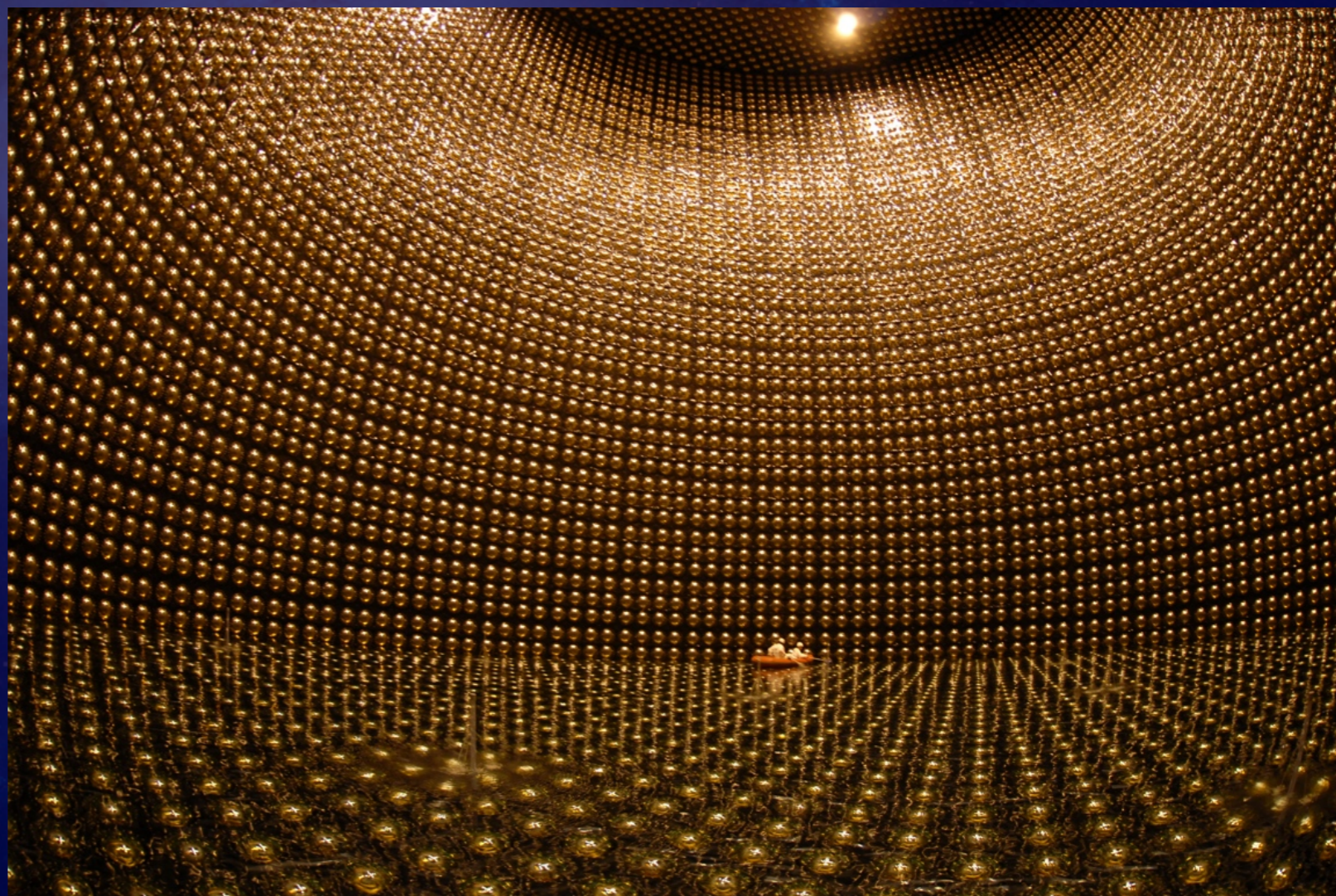
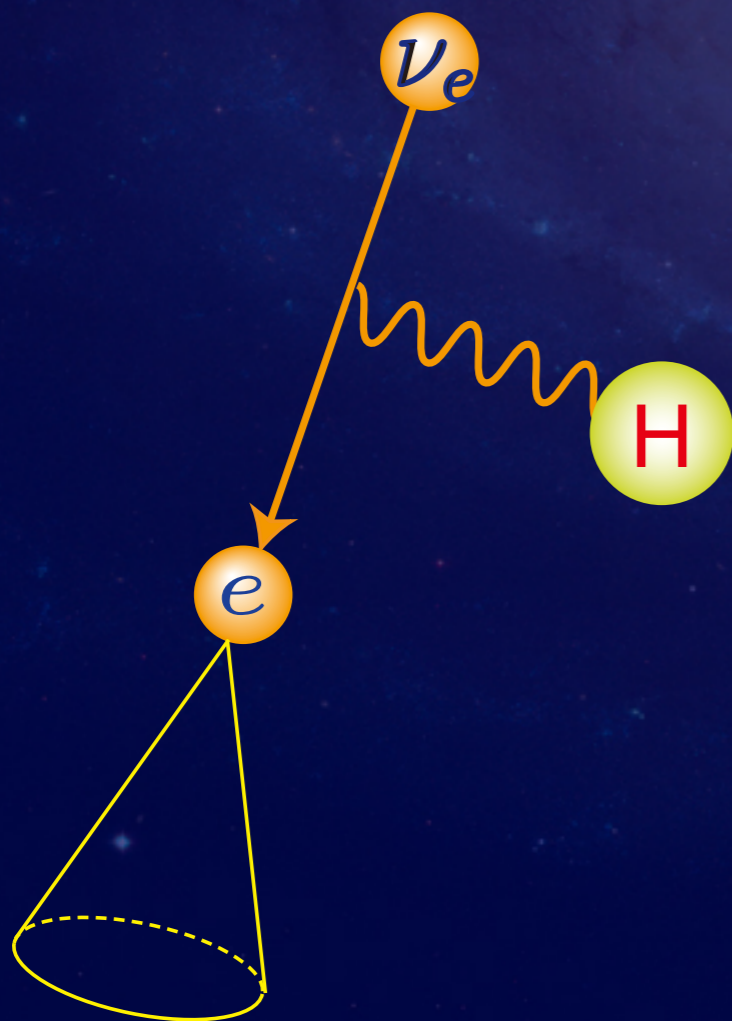
タウ

電荷が無い



ニュートリノ

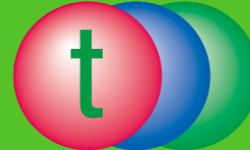
弱い相互作用だけ



写真提供 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

これまでの素粒子のまとめ

クォーク



強い相互作用

レプトン



電磁相互作用



弱い相互作用

第1世代

第2世代

第3世代

小林・益川の論文発表時

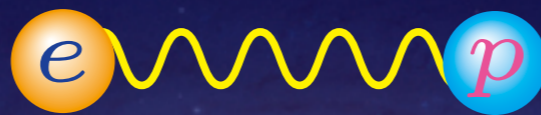
u, d, s クォーク
第1, 2世代のレプトン

素粒子の相互作用

強い相互作用

電磁相互作用

弱い相互作用



グルーオン

光子

W, Z粒子

粒子が伝える

ゲージ粒子

相互作用の基本法則は
対称性の原理で決まっている



規則性、保存の法則

素粒子の標準理論

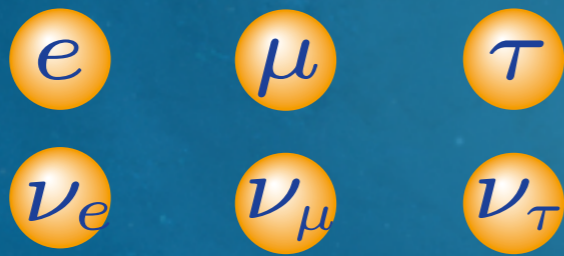
相互作用を決める対称性

クォーク



グルーオン

レプトン



W, Z粒子

光子

「色」の対称性

電弱対称性

粒子が2個のペア

質量無し



質量有り

ヒッグス粒子



自発的
対称性の破れ

標準理論で、唯一未発見

粒子と反粒子

素粒子の基本理論

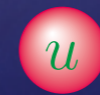
全ての粒子には、
同じ質量、逆符号の電荷をもつ
反粒子がある

粒子

電子



クォーク



Wマイナス

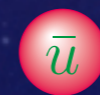


反粒子

陽電子



反クォーク



Wプラス



粒子=反粒子

光子、グルーオン、Z

素粒子の基本法則は
粒子と反粒子の入替え

について **対称**な形

ほとんど

CP対称性

小林・益川理論

完全に対称なら、粒子と反粒子が同じ数



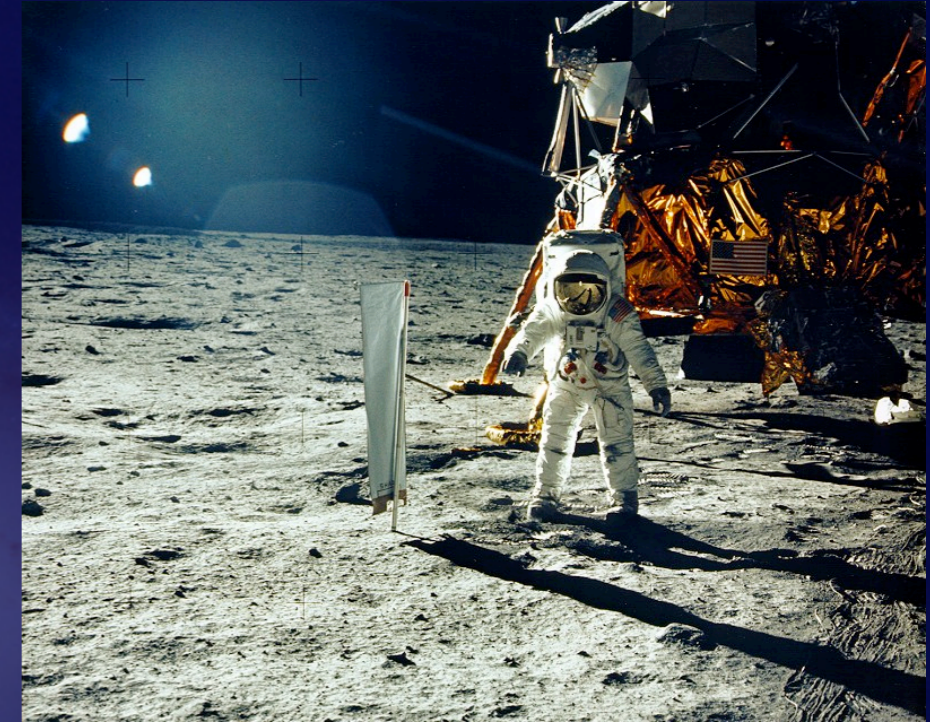
対消滅

現在の宇宙に残っているのは粒子だけ

残っている方を「粒子」と呼んでいる

★月、太陽系惑星は物質でできている

★私たちの銀河も物質でできている



天の川からの宇宙線

$$\frac{\text{反陽子}}{\text{陽子}} = 10^{-4}$$

★銀河や銀河団は、物質または反物質だけでできている

太陽質量の1兆倍

後に見るように宇宙の初期には粒子と反粒子がほぼ同数いたが、その時期に、粒子と反粒子を大量に分離するのは不可能。

なぜ、

現在の宇宙には「物質」しかないのでしょうか？

時間をさかのぼると、

宇宙はどうなっていたのでしょうか？

素粒子が、宇宙と関係があるのでしょうか？

宇宙の歴史を振り返りましょう

ビッグバン宇宙論

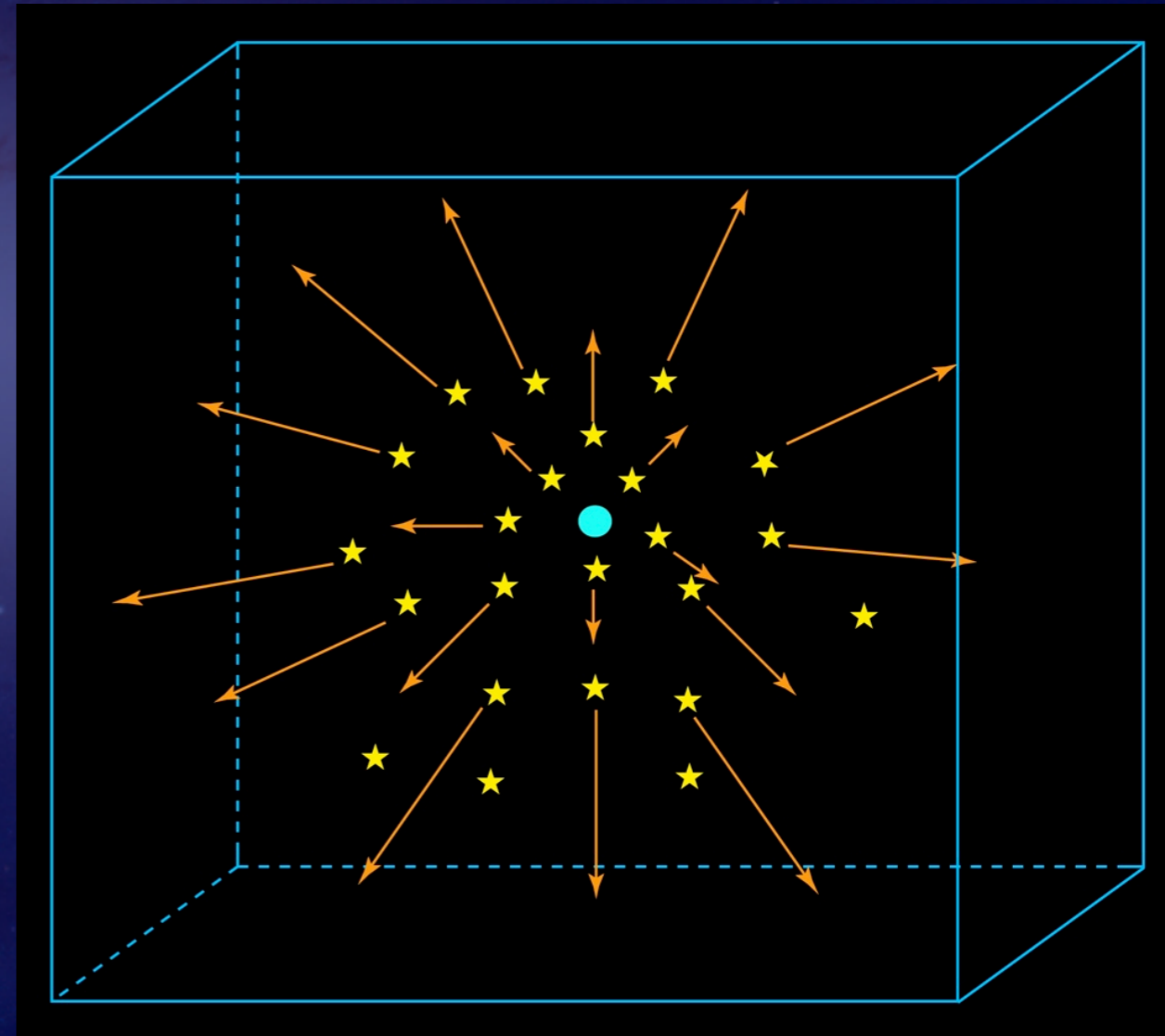
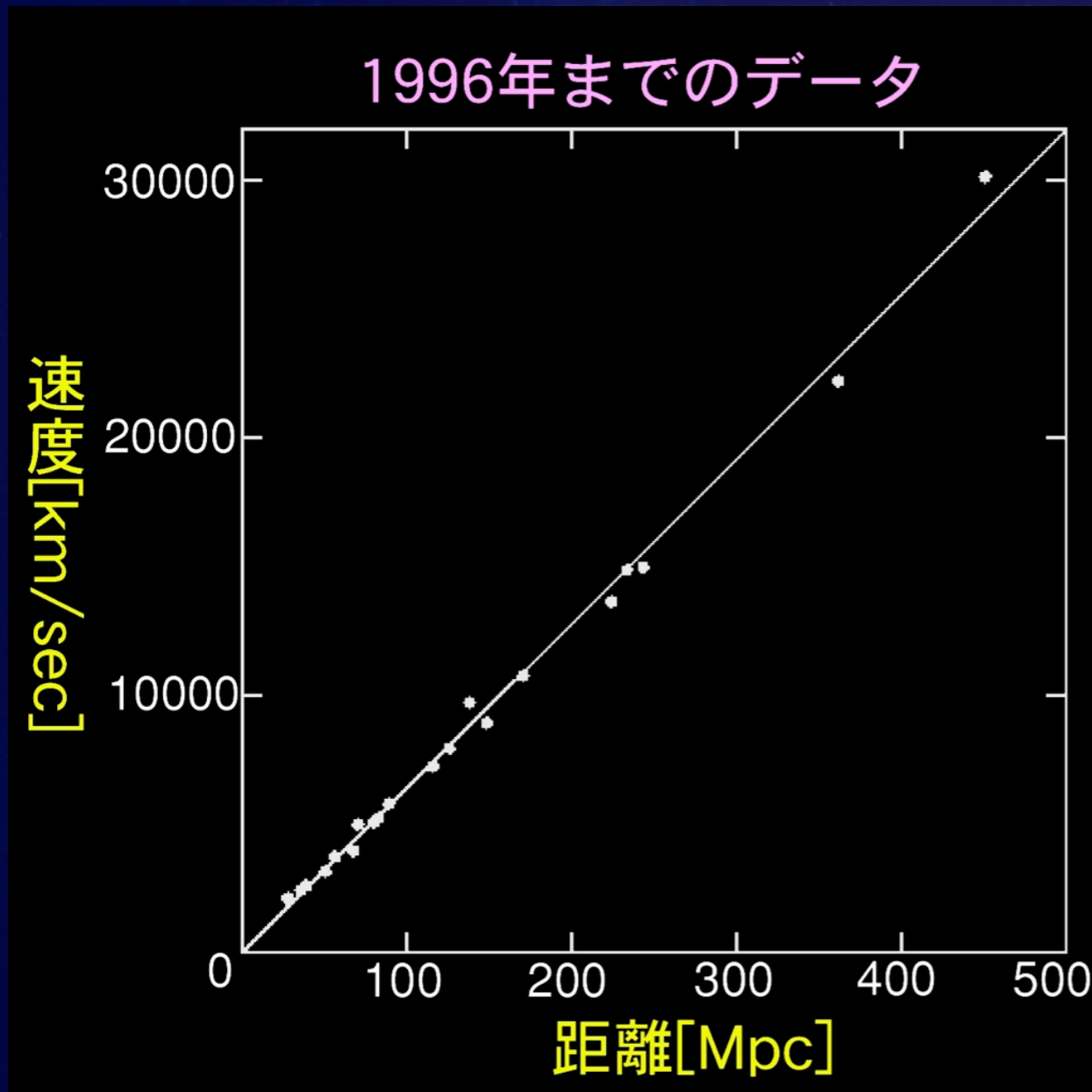
3つの柱

- 宇宙空間は膨張している
- 宇宙は昔、熱かった
- 冷えるうちに、水素やヘリウムなどの軽い元素が自然に現れた

宇宙空間の膨張

ハッブルの法則

遠くの天体は地球からの距離に比例した速度で遠ざかっている

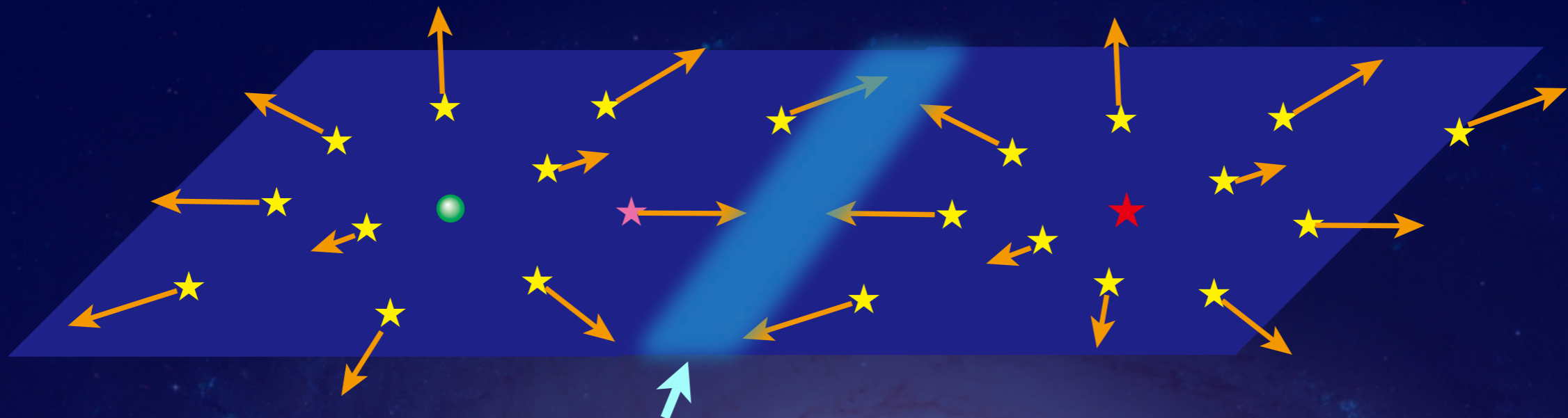


1Mpc (メガパーセク) = 326万光年

地球が宇宙の中心？

2次元面で考えると

他の場所でも成り立つなら



この辺りの星はどう動く？

星が張り付いた面が広がる



どの点の周りでもハッブルの法則が成り立つ

ハッブルの法則

+

空間の一様性

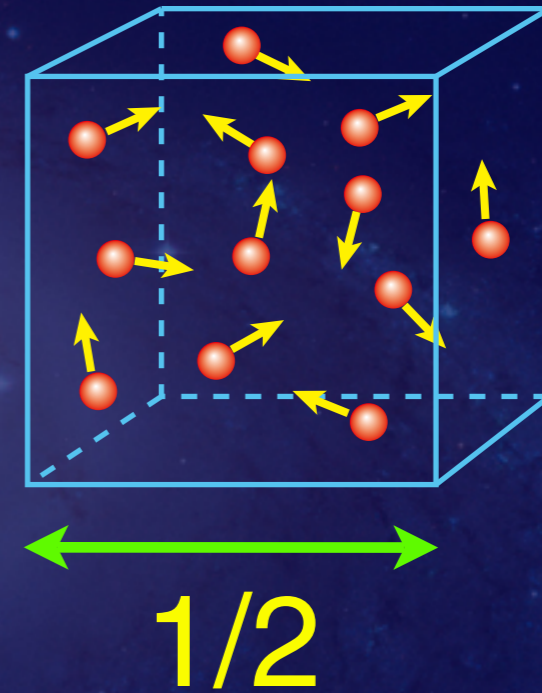
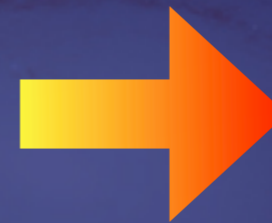
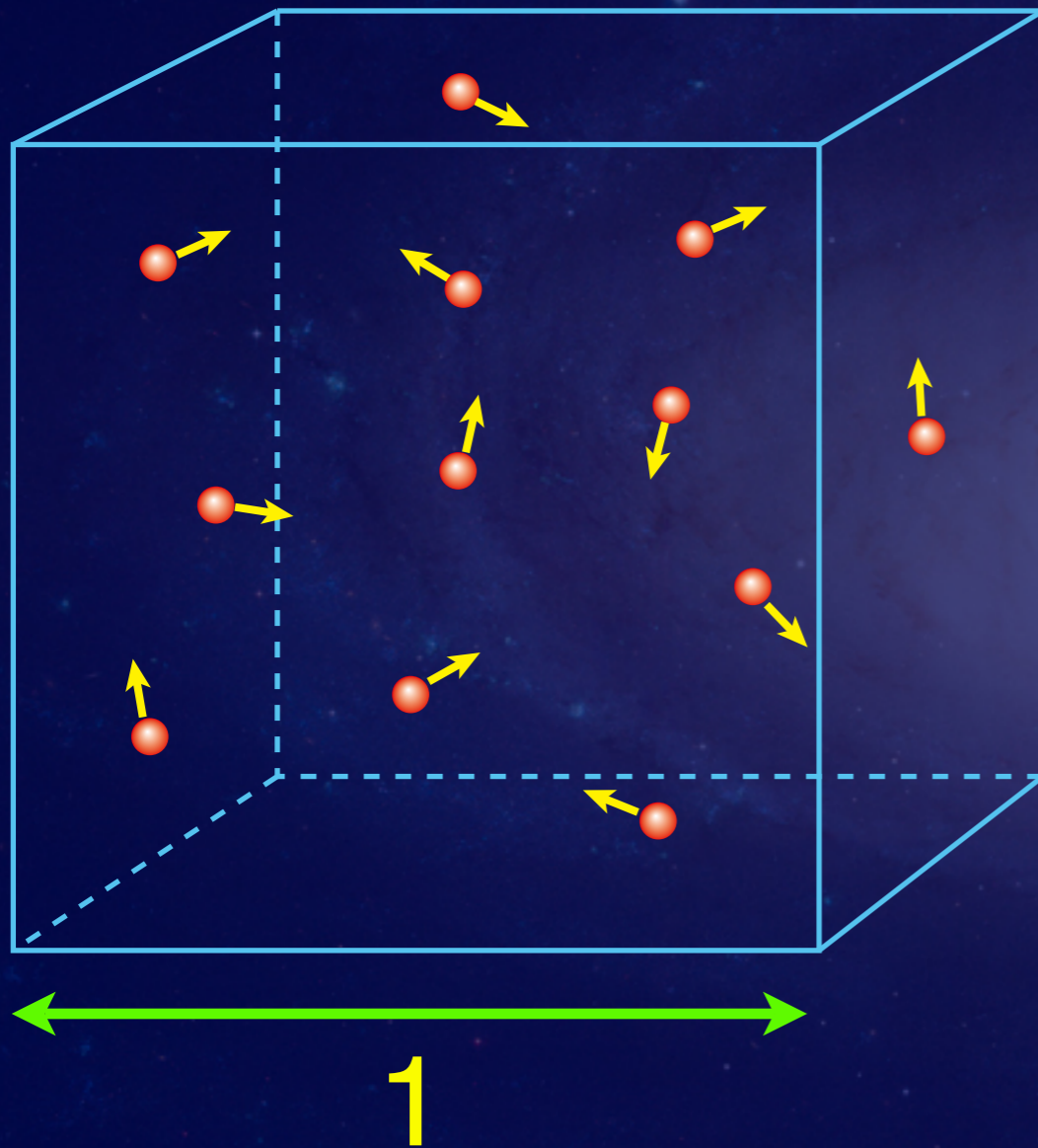
どの場所から見ても、
ハッブルの法則が成り立つ

空間そのものが膨張する

時間をさかのぼると、宇宙の様子は？

宇宙のスケールが**半分**になると

物質のエネルギー密度は？



体積は8分の1

エネルギー密度は8倍

宇宙を満たす電磁波



- 電磁波は光子の集合
- 強い電磁波は光子が多い
- 1つの光子のエネルギーは波長に反比例

宇宙背景放射

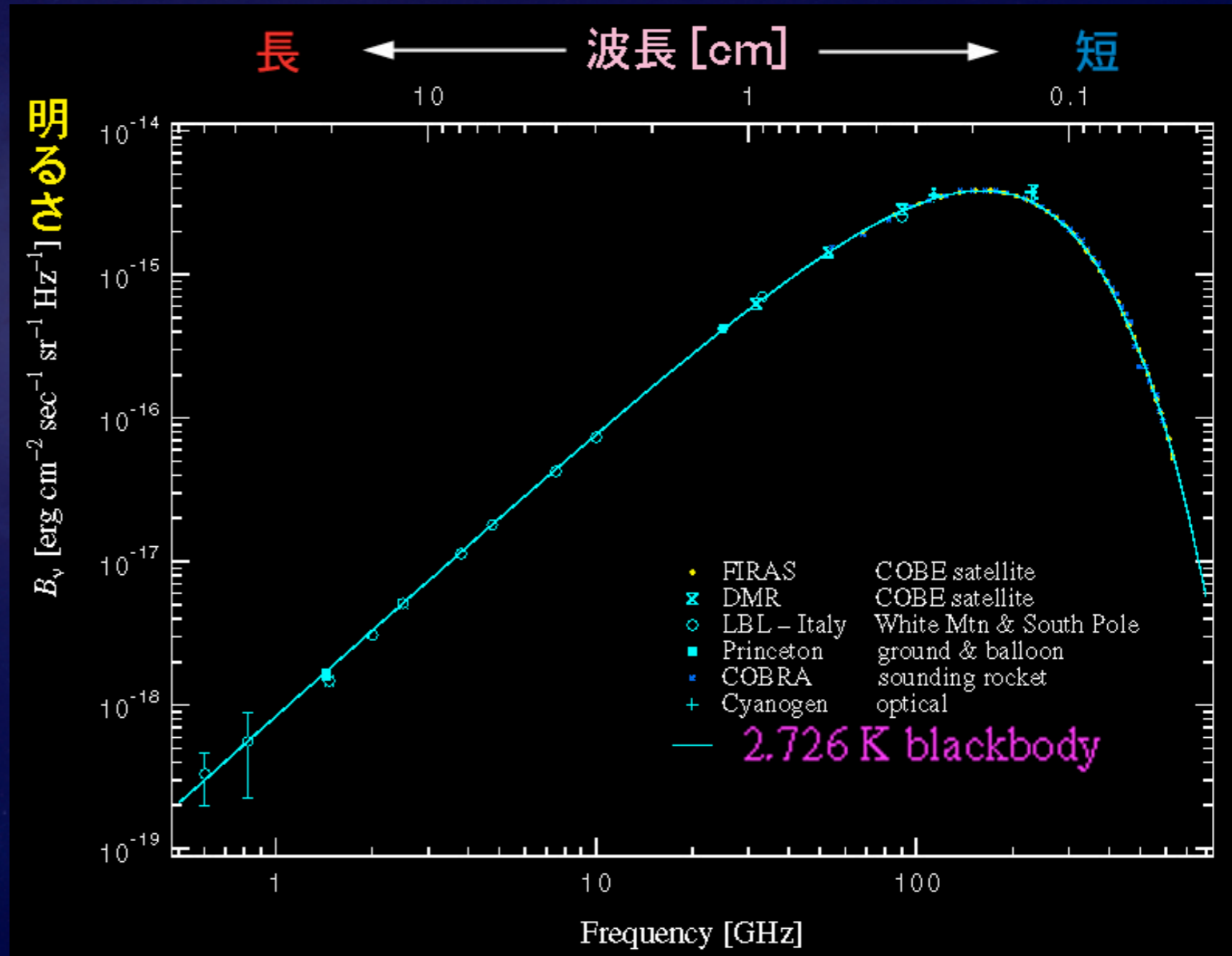
あらゆる方向から一定のスペクトルの電磁波

波長と強度の関係

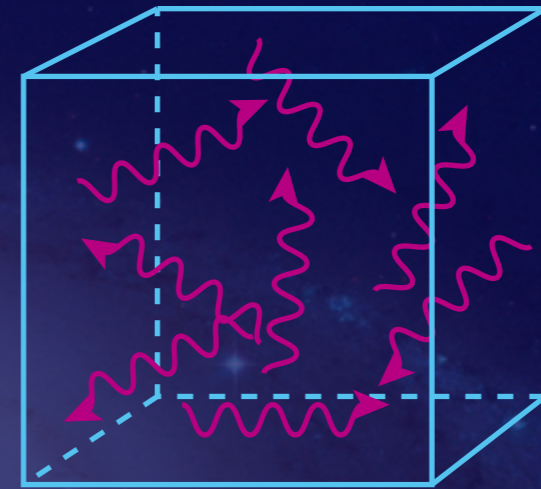
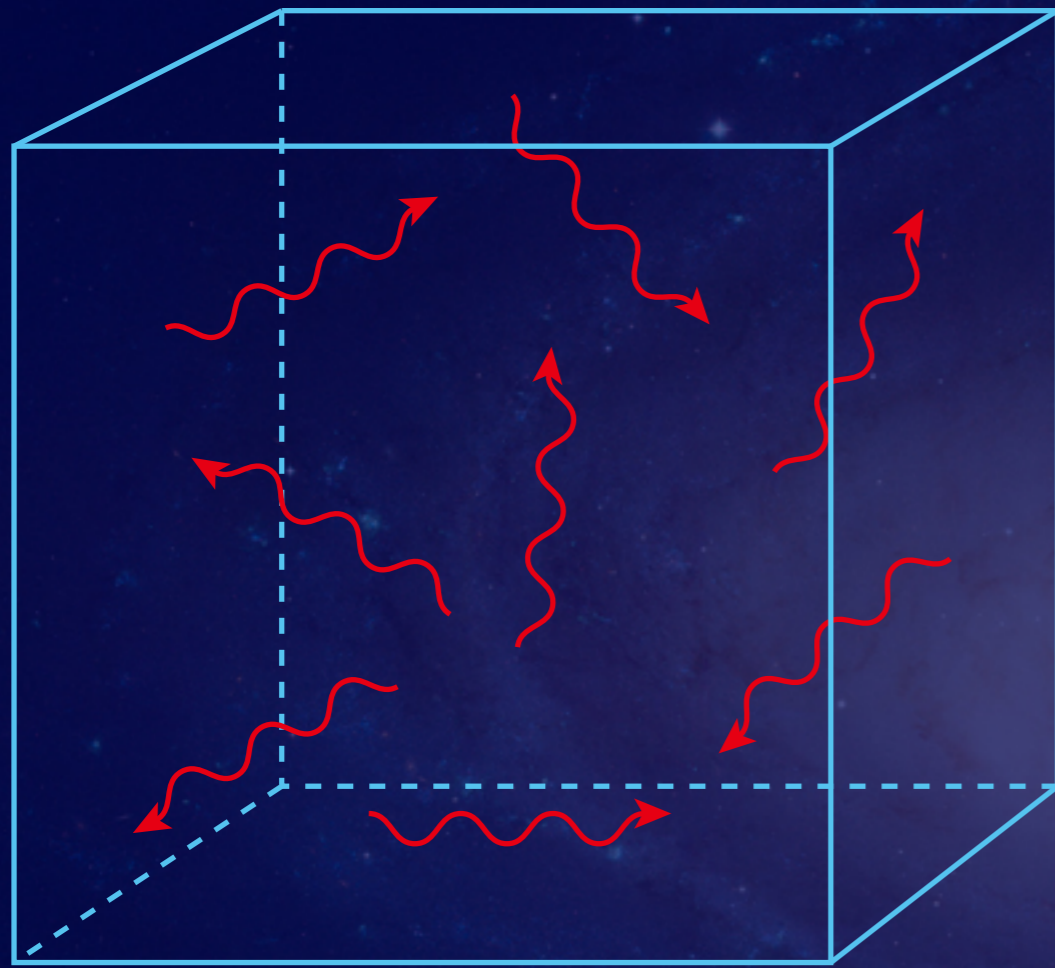


絶対2.7度の
プランク分布

光子の熱平衡
の名残



電磁波(光子)のエネルギー密度は？



体積は8分の1

波長も2分の1

エネルギー密度は16倍

時間をさかのぼると**光子の方が物質より**

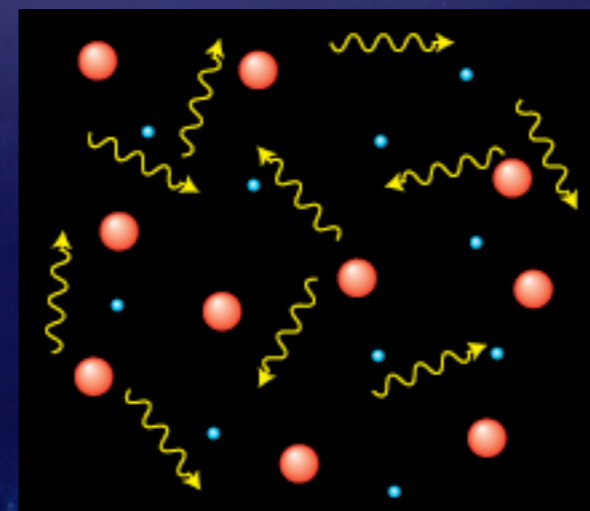
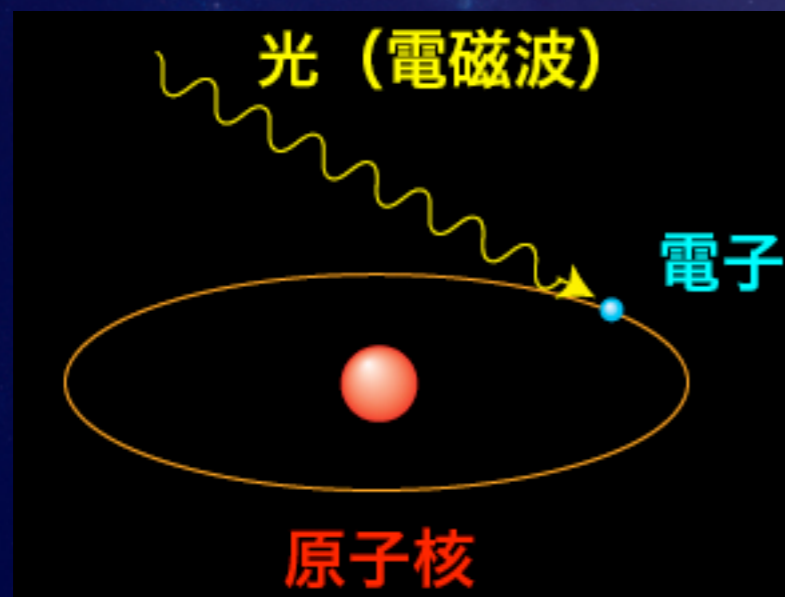
速くエネルギー密度が増加

時間をさかのぼると

温度が約6万度（宇宙が始まって2,000年）で
光子が優勢



高温・高密度の宇宙



光子は
平衡状態

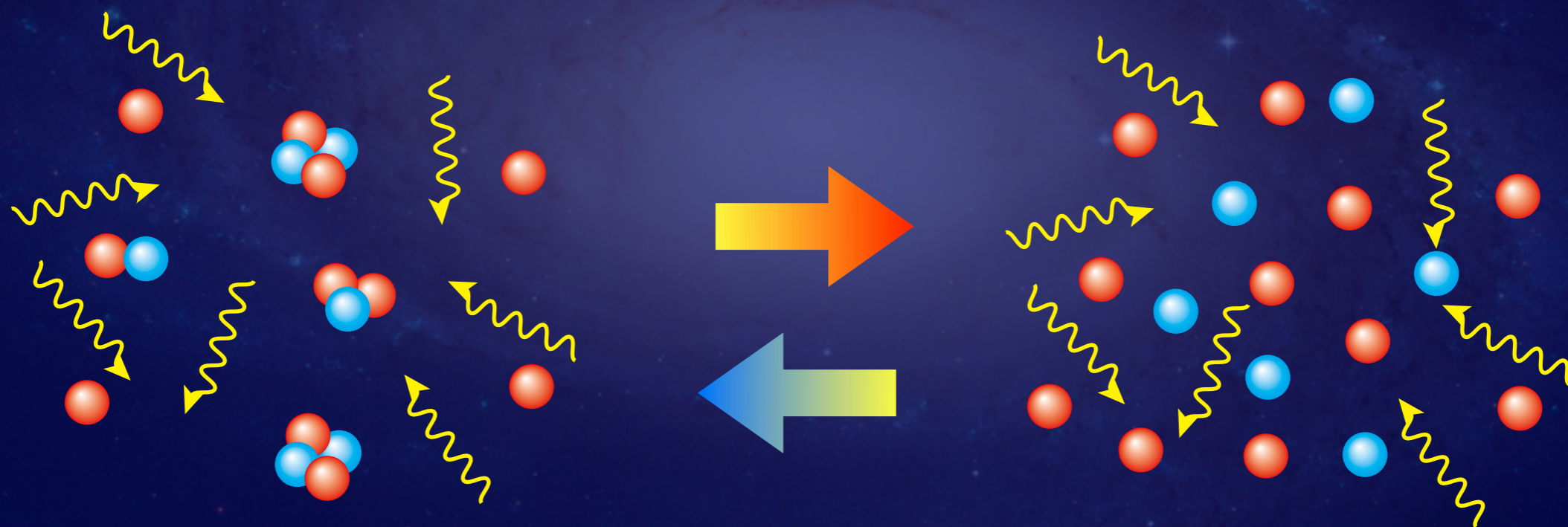
プラズマ

さらに時間をさかのぼると、温度はより高くなる

100億度

光子のエネルギー > 原子核の結合エネルギー

原子核がバラバラに



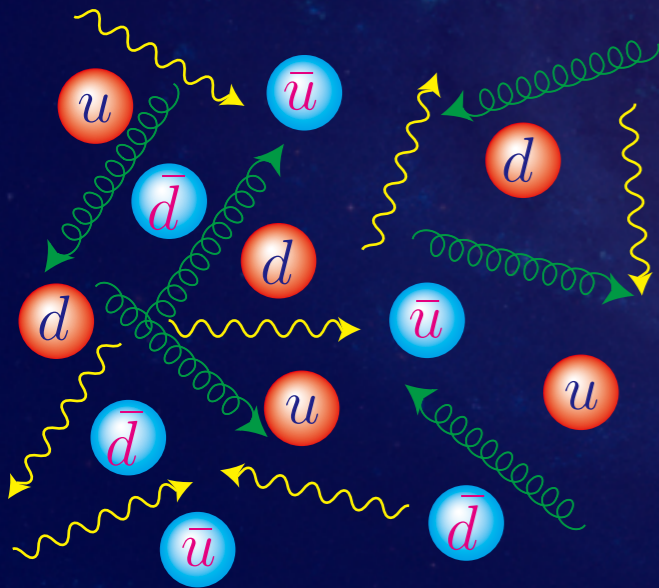
宇宙が冷える時、この温度で元素合成

現在の宇宙になるには、元素合成期に

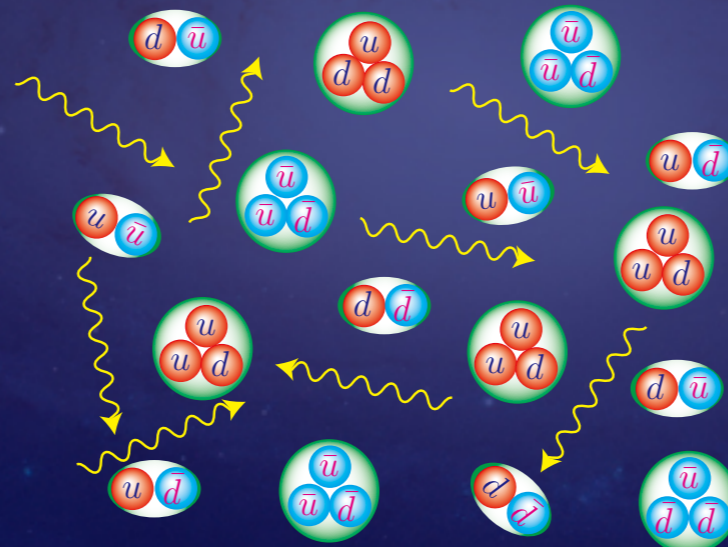
100億個の光子に対して、

6個の陽子・中性子が必要

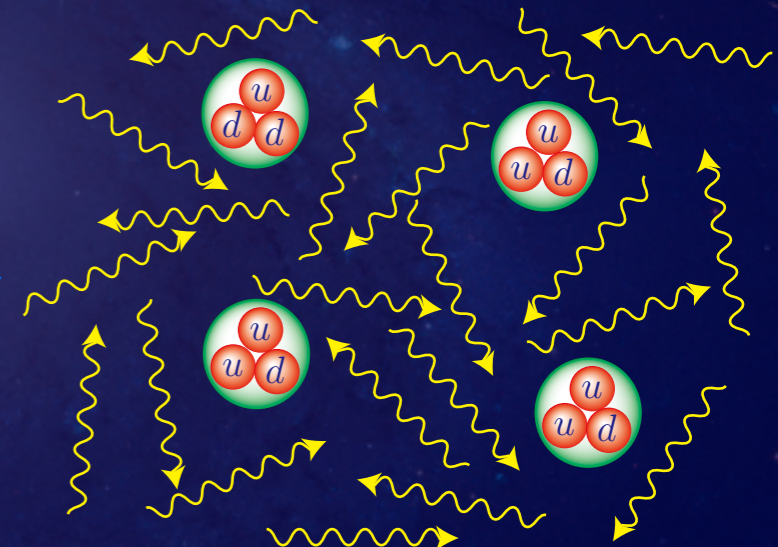
10兆度



2兆度



直後



クォーク
反クォーク
グルーオン

陽子・中性子
反陽子・反中性子
中間子

陽子・中性子
光子
電子・陽電子

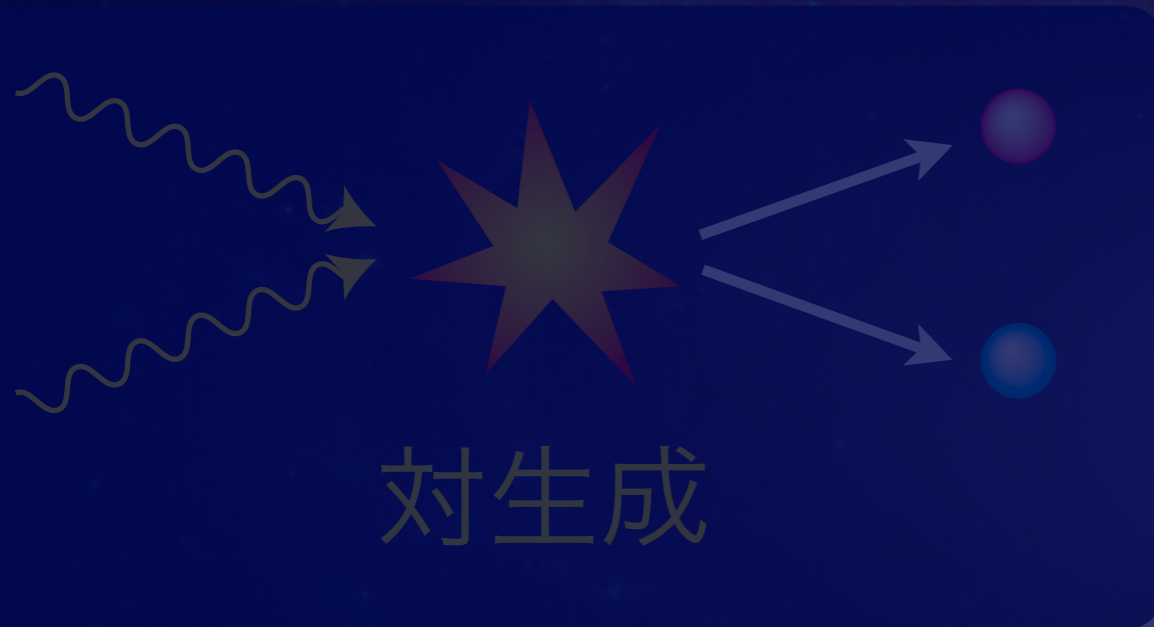
光子、電子・陽電子

光子、電子・陽電子

非常に高温

光子のエネルギー > 粒子・反粒子の質量エネルギー

$$E = 2mc^2$$



2つの過程が頻繁に起これば

光子数 = 粒子数 = 反粒子数

宇宙が冷えていくと、

対消滅だけが起こる

宇宙が2兆度に冷えるまでに、

1,000,000,000個の反クォークに対して
1,000,000,001個のクォークがあればよい

もし、CP対称性が破れなければ、
クォークと反クォークの数は同じ

私たちも存在できない！

素粒子実験でCP対称性の破れの発見

1964年 中性K中間子の崩壊

小林・益川は、標準理論の枠組みで CP対称性の破れを説明した

652

Progress of Theoretical Physics, Vol. 49, No. 2, February 1973

***CP*-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction**

Makoto KOBAYASHI and Toshihide MASKAWA

Department of Physics, Kyoto University, Kyoto

(Received September 1, 1972)

In a framework of the renormalizable theory of weak interaction, problems of *CP*-violation are studied. It is concluded that no realistic models of *CP*-violation exist in the quartet scheme without introducing any other new fields. Some possible models of *CP*-violation are also discussed.

When we apply the renormalizable theory of weak interaction¹⁾ to the hadron system, we have some limitations on the hadron model. It is well known that there exists, in the case of the triplet model, a difficulty of the strangeness changing neutral current and that the quartet model is free from this difficulty. Furthermore, Maki and one of the present authors (T.M.) have shown²⁾ that, in the latter case, the strong interaction must be chiral $SU(4) \times SU(4)$ invariant as precisely as the conservation of the third component of the iso-spin I_3 . In addition to these arguments, for the theory to be realistic, *CP*-violating interactions

小林・益川行列

弱い相互作用---クォークとW粒子---の係数

複素数ならCP対称性が破れる

$$z = x + \sqrt{-1}y = \sqrt{x^2 + y^2} e^{\sqrt{-1}\theta}$$

2世代

$$(u \ c) \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix} \times W$$

3つの複素数、3つのクォークの相対位相

3世代

$$(u \ c \ t) \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \times W$$

6つの複素数、5つのクォークの相対位相

複素数が1つ残る

小林・益川理論の検証

多量のB中間子を使った精密実験

- ★つくば 高エネルギー加速器研究機構(KEK)
- ★米国 スタンフォード線形加速器センター

「標準理論の先」を求めて、更なる実験

標準理論で、宇宙の物質・反物質の
非対称性は説明できるか？

NO !

標準理論は成功をおさめている

B中間子実験による小林・益川理論の検証

小林・益川理論は新しい物理を探る出発点

★ ヒッグス粒子

★ ニュートリノ質量

★ ダークマター

★ 宇宙の物質の起源

★ 背景放射の揺らぎ

★ ダークエネルギー

★

← 実験・観測で存在は明らか

幾つかの問題は

1つの理論で解決するかも

実験・観測から新事実

将来のノーベル賞

おわりに

素粒子、宇宙には、未解決の問題があります。
理論と実験が両輪となり、解明しようと研究
が進行中です。

本日、お話しできなかったことは、

宇宙 起源 - Google 検索

http://www.google.co.jp/search?hl=ja&q=宇宙 起源

アップル .Mac Amazon.co.jp Yahoo! JAPAN ニュース (417) アップル (22) アップル

ウェブ 画像 地図 ニュース グループ Gmail more ▼ ログイン

Google 宇宙 起源 検索 検索オプション 表示設定

ウェブ全体から検索 日本語のページを検索

ウェブ 宇宙 起源 の検索結果 約 552,000 件中 1 - 10 件目 (0.31 秒)

宇宙の物質の起源
宇宙物理学の概論。ビッグバンから物質の起源、残された問題について解説。
astr.phys.saga-u.ac.jp/~funakubo/BAU/ - 10k - キャッシュ - 関連ページ

宇宙の起源 ~Origin Of Space~ | 宇宙 ビッグバン アインシュタイン ...
宇宙の起源について人間は古代から想像、議論していました。アインシュタインなど学者らの
相対性理論、膨張宇宙論、ビッグバン宇宙論、定常宇宙論、宇宙背景放射を解説。
space.shinesbrightly.com/space_me/ - 14k - キャッシュ - 関連ページ

宇宙起源
こうした熱力学的な死は「閉鎖系宇宙」であればおこるが、実際の宇宙はそれ自体が巨大な散
逸構造をなしており、「開放系宇宙」なのである。そこにはエントロピーを外部にすてること

スポンサーリンク

宇宙起源
1500円以上国内配送無料
本・洋書・雑誌・コミック
Amazon.co.jp

宇宙の物質の起源

あなたは今世紀 人目の聴講生です。

我々の体や地球、太陽などの天体は物質で出来ています。
現代の物理学では物質に対して必ず反物質があることが知られています。
しかし、我々の周りを見回しても反物質は見当たりません。反物質が物質と出会うと非常に高エネルギーのガンマ線になってしまいます。
では長い長い宇宙の歴史の中で物質はどこから来たのでしょうか？

ここでは宇宙の歴史を振り返りながら、物理学がその謎を解き明かそうと挑んできた物質の起源について紹介したいと思います。

★第1章 現在の宇宙の姿

これまでの観測から分かっていることを紹介します。
宇宙の大きさ、宇宙の密度は？宇宙はじっとしているのでしょうか？

★第2章 宇宙は昔、熱かった

観測事実を組み合わせると何が言えるのでしょうか？
時間をさかのぼると宇宙の姿はどうなるのでしょうか？

★第3章 物質を作っているもの

物質を作っているおおもとは何なのでしょうか？
それは「素粒子」と呼ばれるものですが、素粒子について私たちはどこまで知っているのでしょうか？

★第4章 ビッグバン宇宙論

初めは熱い素粒子の集まりで出来ていた宇宙はどのような過程を経て冷えてきたのでしょうか？

★第5章 物質の起源

宇宙のごく初めは非常に高温で、物質はバラバラの素粒子の集まりになっていました。何かを切っ掛けとして粒子と反粒子に差が付いたのですが、それはいつ、どうやって差が付いたのでしょうか？
そしてそれからどうやって星や銀河が出来たのでしょうか？

★第6章 残された問題

ビッグバン宇宙論は成功をおさめていますが、まだ未解決の問題があります。現在でも未解決で研究者が挑んでいる問題とはどんなもの
でしょうか？