

天文学研修講座 ーガス星雲から宇宙の大構造までー

長島 雅裕(長崎大学教育学部)

内容

- 物理学としての天文学
- 星間ガスの物理
- 銀河とは何か
- 宇宙の大構造の進化と銀河の形成
- 科学とニセ科学

質問などありましたら、いつでもお気軽にどうぞ。

はじめにー自己紹介を兼ねて

- 現代天文学は物理学の一分野
 - 「宇宙物理学」という場合が多い
- 私の場合：物理学科で4年生になって研究室配属を決める際、宇宙の研究室を選んだ
 - 当時の「池内グループ」…池内了を教授とする研究室（私の指導教官は当時の助教授[現・国立天文台教授]の人）
- 物理法則を駆使して宇宙における諸現象を解明するのが目的
 - 「基礎科学」ではあるが「応用物理」
- 単純な法則の組み合わせがいかに複雑な現象を生み出すかを理解する

現代にはびこるニセ科学



はじめに

- 「地学分野」の中でも、天文・気象は物理学を知らないと研究できない
- 地球そのものについても、地球物理的なアプローチの場合は物理学が必要
- これらに興味のある生徒さんには、ぜひ高校で物理を学ぼうと言ってあげてください！

- 今日の話は、高校物理が理解できれば、(じっくり考えれば)大体ちゃんと(=根底から)理解できると思います。

天文学のスケール：考え方

- 長さ、時間、質量
- 天文学の対象は多岐にわたるので、桁で考える(細かいことにとらわれず、本質を見る)
 - 「1=2」…2倍程度は誤差のうち
 - 10^x の x に注目する[$x=\text{Log}(10^x)$]

長さのスケール

- 素粒子から宇宙全体まで…60桁

Log_{10} (長さ[m])

- 34 プランク長(宇宙の誕生?)
- 15 原子核(元素合成、恒星の内部)
- 10 原子(ガス)
- 5 細胞
- 0(→1m)哺乳類
- 7 地球型惑星
- 8 木星型惑星
- 9 恒星(太陽)
- 11 太陽系(1天文単位)
- 16 恒星間距離
- 20 銀河(大きめのもの)
- 22 銀河団、平均銀河間距離
- 26 宇宙(「地平線」のサイズ)

時間スケール

- 時間

Log_{10} (時間[sec])

- 44 プランク時間(不確定性原理、宇宙の誕生?)
- 2 核子(陽子、中性子)の誕生
- 2 元素合成(ヘリウム、リチウムの合成)
→「宇宙創成最初の3分間」
- 5 地球の自転(一日)
- 6 一カ月(3×10^6 sec)
- 7 一年(3×10^7 sec)

Log_{10} (時間[年])

- 7 大質量星の寿命(超新星爆発)
- 8 銀河系の回転周期
- 9 銀河系周囲のダークマターが一周する時間
- 10 宇宙年齢、小質量星(太陽程度)の寿命

質量スケール

- 質量

$\text{Log}_{10}(\text{質量}[\text{kg}])$

-30 電子の質量

-27 原子の質量

2 人間

24 地球

30 太陽($=2 \times 10^{30} \text{kg}$)

$\text{Log}_{10}(\text{質量}[\text{太陽質量}])$

6 球状星団

9 矮小銀河

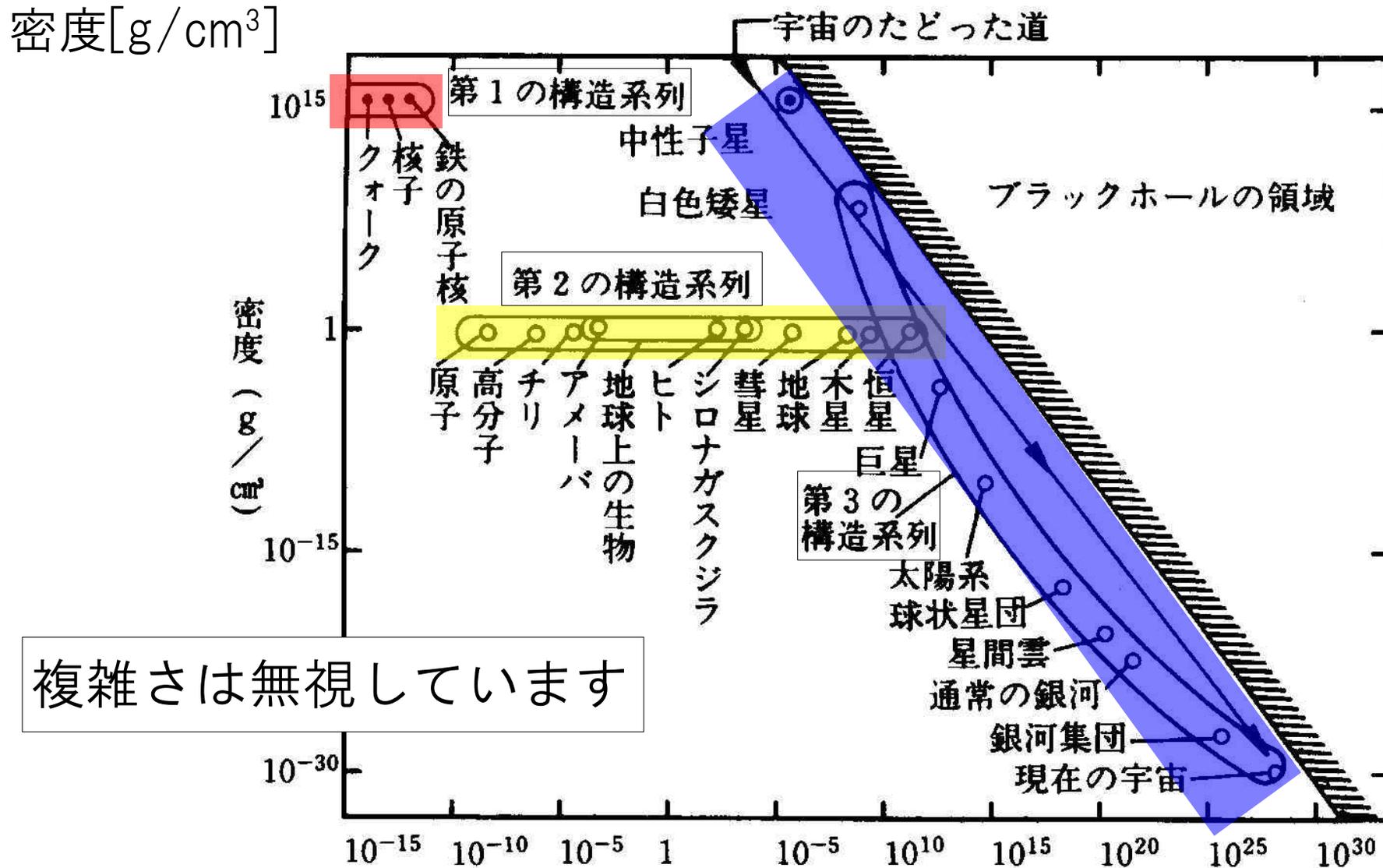
11 大きめの銀河(銀河系など)

12 局所銀河群

14 銀河団

22 宇宙全体(地平線の内側)

自然界における物質の密度とサイズ



複雑さは無視しています

★3つの系列に分かれる

サイズ [cm]

自然界における4つの力(相互作用)

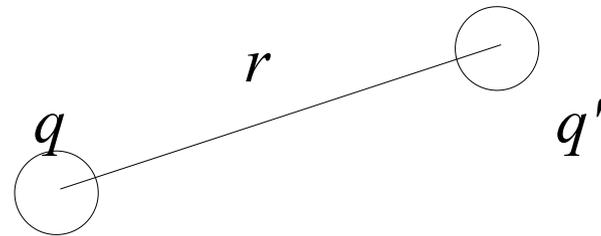
- **強い相互作用**(第1の構造系列)
 - 核力の源(湯川秀樹)、原子核反応
 - 原子核を固める・・・陽子同士は電氣的には反撥するが、それよりも強い力で引き付ける
- **電磁相互作用**(第2の構造系列)
 - 電気、磁気の源、化学反応
- **重力相互作用**(第3の構造系列)
 - 正の質量しかないので、長距離で重要
- **弱い相互作用**(構造は作らない)
 - β 崩壊を引き起こす

電磁相互作用

- クーロン力

- 電荷の積に比例し、距離の自乗に反比例

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{qq'}{r^2}$$



- 電荷には正負の符号がある

- 正電荷のまわりには負電荷が集まる
 - 遠く離れると、あたかも電荷がゼロのように見える
- 日常では、(水溶液中のイオンを除けば)電氣的に中性

電磁相互作用と原子

- 原子の構造

- 正電荷の原子核を負電荷の電子が取り巻く

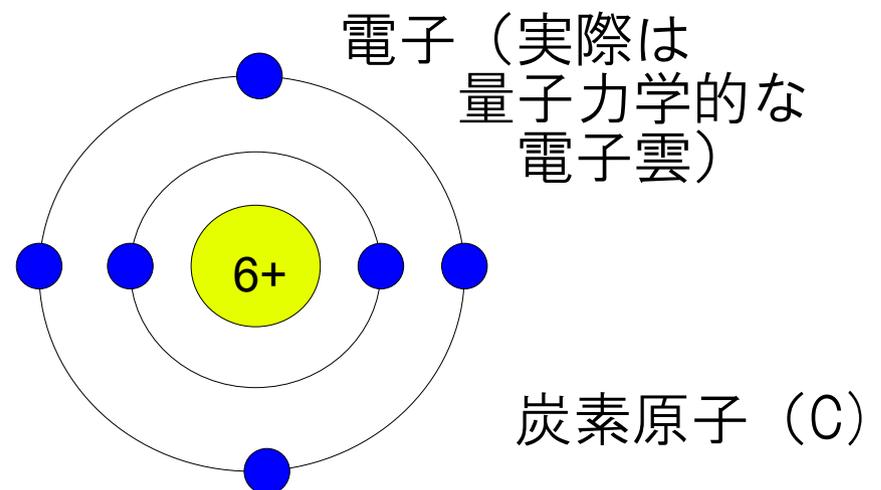
- 原子の大きさ

- ボーアの量子条件

- ド・ブロイの物質波の波長の整数倍が円周の長さ

- 原子核との電磁気力による引力

- 日常世界の「積み木」

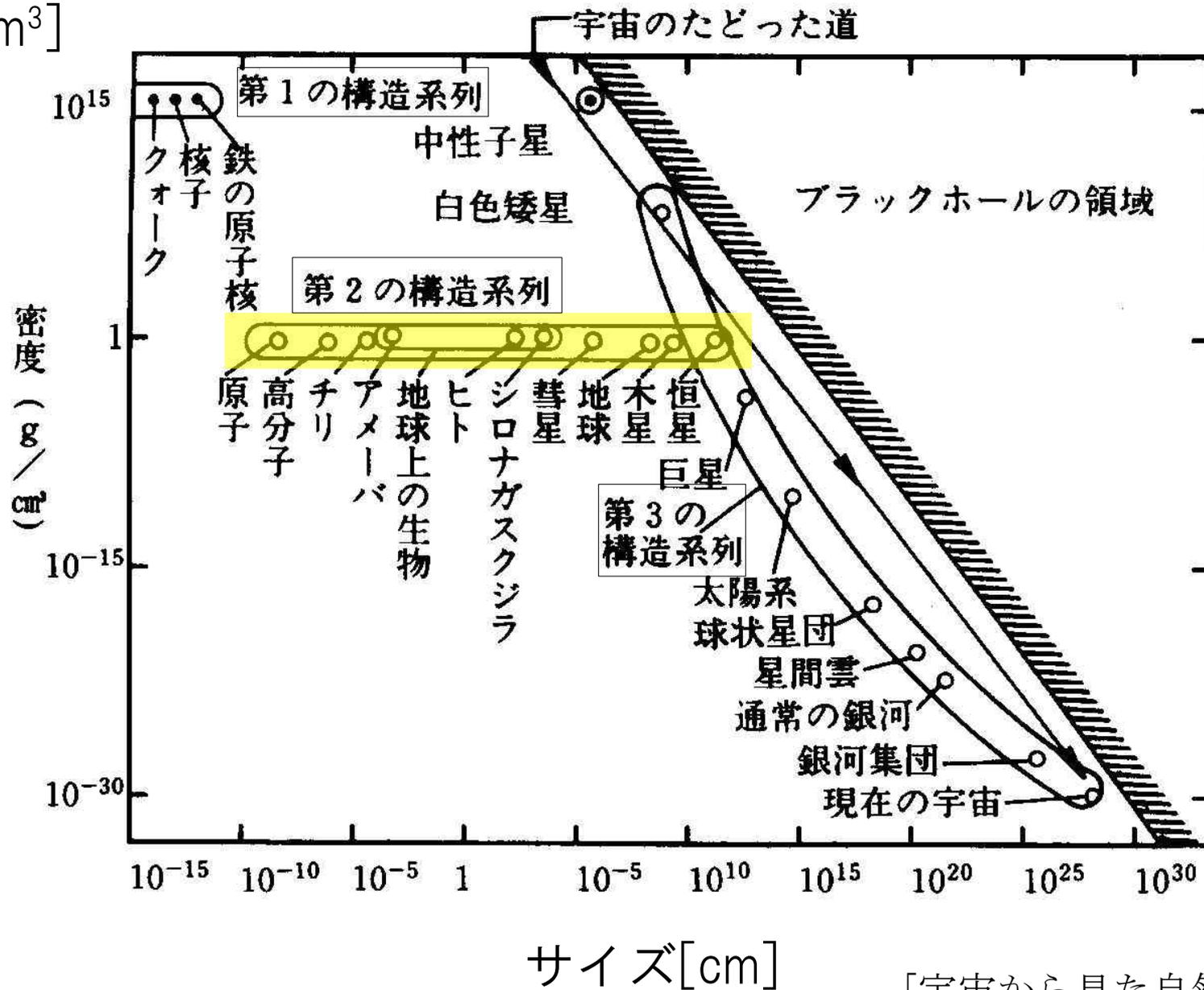


日常世界：原子の「積み木」

- 原子が集まって分子や結晶を作る
 - 密度は大して変わらない
 - 無論、金属や重元素は密度が高いけれども、2桁も変わらない
- 分子が集まって細胞を作る
- 細胞が集まって生物を作る
- 「複雑さ」は増すけれども、原子という「積み木」でできているので、密度はたいして変わらない
- 生物・・・電磁相互作用の産物

自然界における物質の密度とサイズ

密度[g/cm^3]



強い相互作用

- ミクロで働く力 (マクロには表れない)
- クォーク間に働く
 - アップ、ダウン、ストレンジ、チャーム、ボトム、トップの6種類
 - 陽子や中性子はクォーク3つから成る
 - 中間子はクォーク2つ
 - 小林-益川理論により、6種類のクォークが预言された→そのうちノーベル賞？
- 陽子や中性子の間では「核力」として現れる
 - 湯川秀樹が预言、ノーベル賞
 - 同じ電荷の陽子同士を結びつける、強い力
 - コンプトン波長と原子核サイズ \Leftrightarrow 中間子の質量

強い相互作用と核力

不確定性原理 \Leftrightarrow コンプトン波長

$$p r \approx \frac{h}{2\pi} \quad r \approx 2 \times 10^{-15} \approx \frac{h}{2\pi p} \approx \frac{h}{2\pi m c}$$

$$m \approx \frac{h}{2\pi \lambda c} \approx \frac{6 \times 10^{-34}}{2\pi \cdot 2 \times 10^{-15} \cdot 3 \times 10^8} \approx 1.6 \times 10^{-28} [\text{kg}]$$

「電子の質量の約200倍」

湯川秀樹のノーベル賞論文

On the Interaction of Elementary Particles. I.

By Hideki YUKAWA.

(Read Nov. 17, 1934)

1935]

On the Interaction of Elementary Particles. I.

53

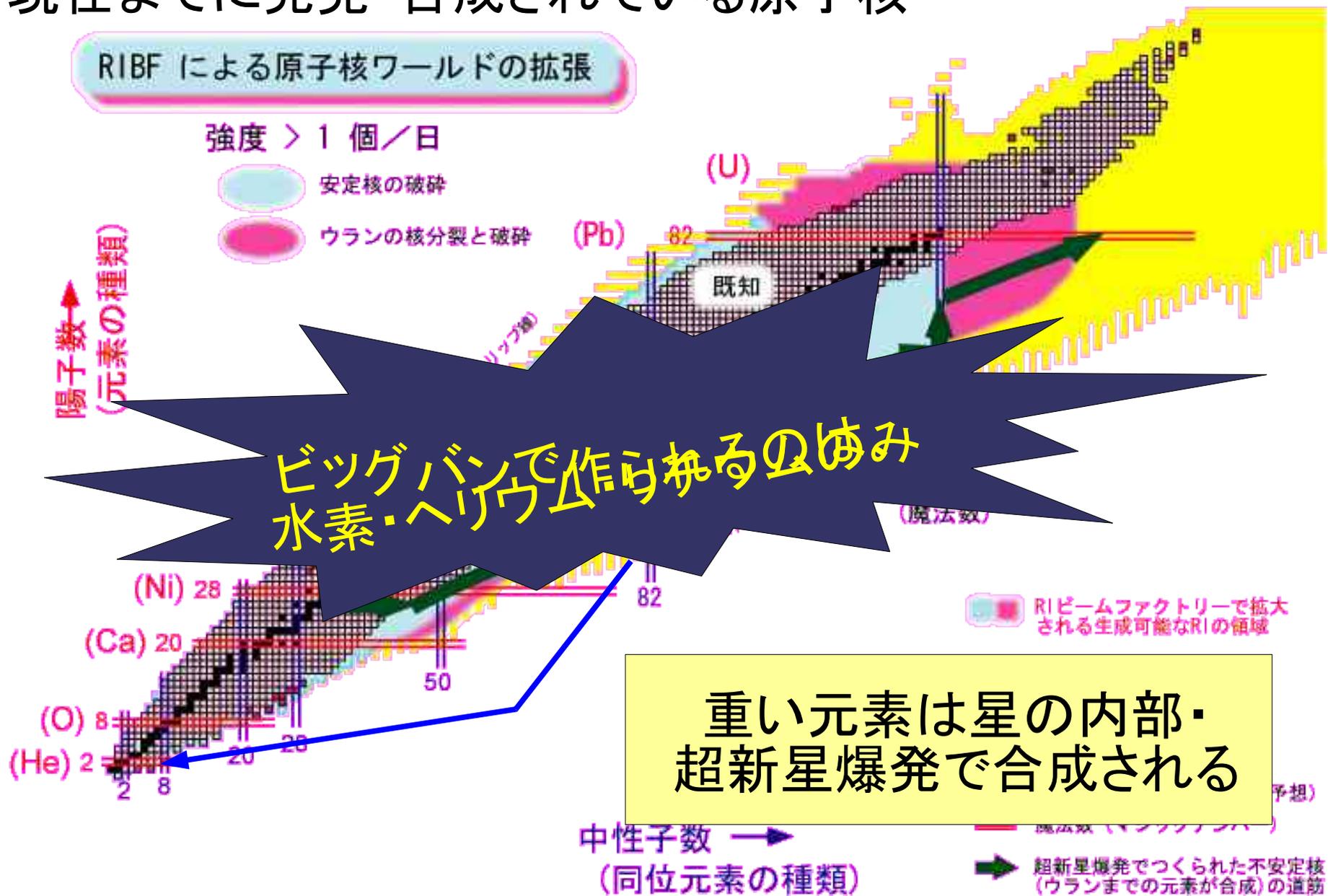
Assuming $\lambda = 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-1}$, we obtain for m_{ν} a value 2×10^2 times as large as the electron mass. As such a quantum with large mass and

陽子、中性子(核子)

- 核子は原子核を作る「積み木」
- 核子が集まって原子核を作る
 - 例:炭素は陽子6個、中性子6個
- 核子1個の密度が原子核の密度にほぼ相当
- 原子核のサイズ:質量数Aとして、大体、
$$r \simeq (1.2 \sim 1.3) \times 10^{-15} A^{1/3} [\text{cm}]$$
 - つまり、密度一定
 - 核子の積み上げでできている

核図表 (理研のウェブページより)

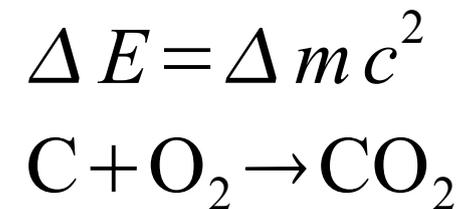
- 現在までに発見・合成されている原子核



原子核と天文学

- 原子核反応: 恒星のエネルギー源
- 化学反応より何桁も強い
- 核反応と化学反応の違いを見よう
 - エネルギーの違いを質量欠損で見る
 - 二酸化炭素1mol当たり 4×10^5 [J]生成

$$\Delta M = \frac{E}{c^2} \simeq \frac{4 \times 10^5 [\text{J}]}{(3 \times 10^8 [\text{m/s}])^2} \simeq 5 \times 10^{-12} [\text{kg}]$$



- $4\text{H} \rightarrow \text{He}$ の反応では、約0.7%の質量が減る
- 4gの水素が反応、1molのHeが生成

$$\Delta M = 0.007 \times 4 [\text{g}] = 2.8 \times 10^{-5} [\text{kg}]$$

$$E \simeq 2.8 \times 10^{-5} [\text{kg}] \times (3 \times 10^8 [\text{m/s}])^2 \simeq 2.5 \times 10^{12} [\text{J}]$$

7桁違う!

太陽の寿命

- 観測される光度は $L_{\odot} = 4 \times 10^{26} [\text{W}]$
- 質量は $M_{\odot} = 2 \times 10^{30} [\text{kg}]$
- 全水素の1割程度が燃え、0.7%の質量が減少
- 寿命 τ は、

$$\tau \simeq \frac{0.007 \times 0.1 M_{\odot} c^2}{L_{\odot}} \quad \frac{\text{放出される総エネルギー}}{\text{単位時間当たり放出されるエネルギー}}$$

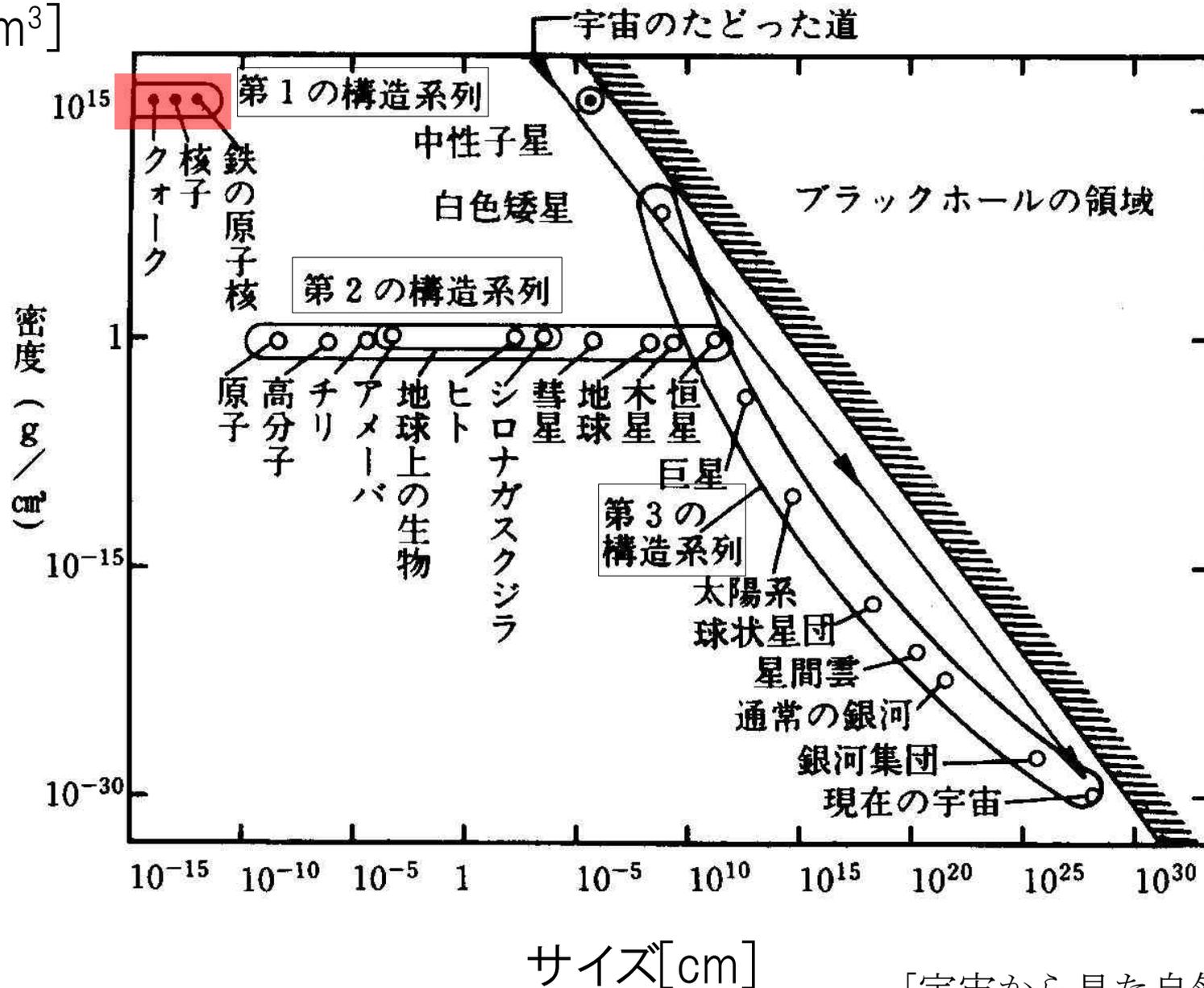
$$\simeq \frac{7 \times 10^{-4} \times 2 \times 10^{30} [\text{kg}] \times (3 \times 10^8 [\text{m/s}])^2}{4 \times 10^{26} [\text{W}]} \simeq 3.1 \times 10^{17} [\text{s}]$$

$$\simeq 1 \times 10^{10} [\text{yr}] = 10 [\text{Gyr}]$$

→ 100億年

自然界における物質の密度とサイズ

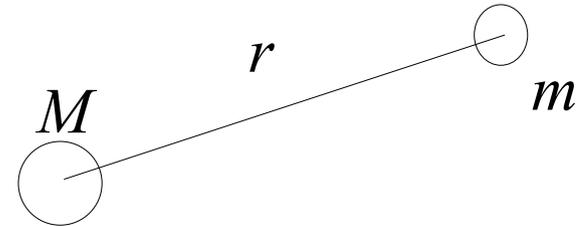
密度[g/cm³]



重力相互作用

- ニュートン重力(万有引力)

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$



- クーロン力に似ているが、**正符号のみ**
- 重力は弱いけれども、反撥しないため、大量に物質が集まると重要になる→天体スケール
- 異符号質量による「遮蔽」がないので、密度は一定ではない
- 重力と遠心力の釣り合い**

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \rightarrow \frac{GM}{r} = v^2 < c^2 \quad (\text{光速})$$

位置エネルギーと
運動エネルギーの
釣り合い

- 質量 = 密度(ρ) \times 体積(サイズの3乗)より $r < \frac{c}{\sqrt{G\rho}}$

宇宙の誕生
量子力学と一般相対論を
合体させる必要

シュバルツシルト半径
(ブラックホールのサイズ)

$$r = \frac{2GM}{c^2} \rightarrow \rho \simeq \frac{c^2}{Gr^2}$$

コンプトン波長

(不確定性原理から決まる
長さの最小スケール)

$$p \cdot r \simeq h$$

$$p \cdot r \simeq mc \cdot r \simeq \rho r^4 c \simeq h$$

$$\rightarrow \rho \simeq \frac{h}{cr^4}$$

すべての物質は、この三角
形の中に納まり、かつ三角
形内部で局在する。
すべてが天文学の対象

「観測的宇宙論」池内了

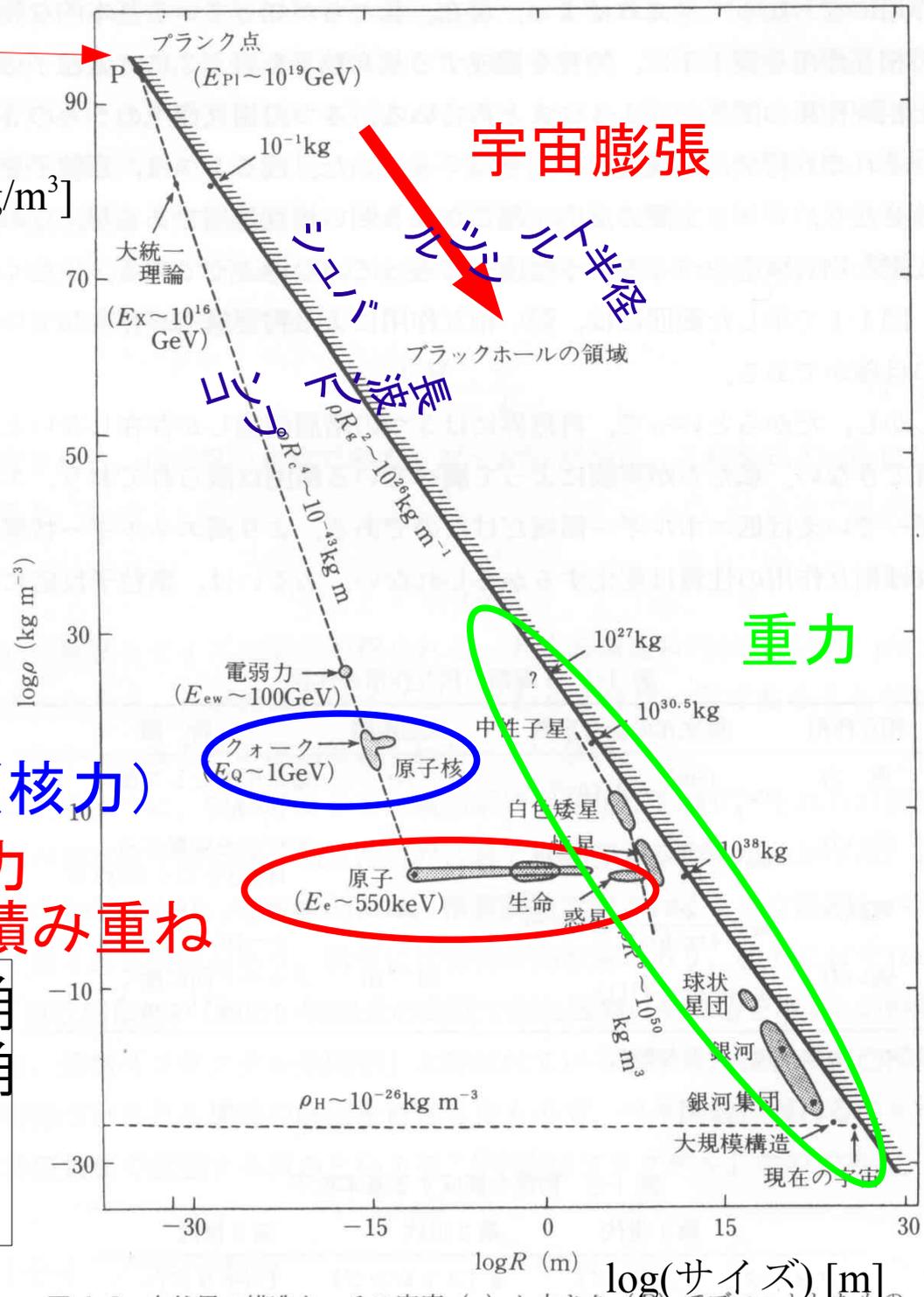


図 1-2 自然界の構造を、その密度 (ρ) と大きさ (R) でプロットしたもの

重力とは何か

- 質量に付随する力
 - 質量があれば働く力
 - 電磁気力 \leftrightarrow 電荷
- より根源的には、「時空の歪み」に相当
 - 一般相対性理論
 - 歪みが小さい時、ニュートンの万有引力になる
- 他の相互作用よりずっと弱い
 - 地球の重力より、手のひらの磁石の力が強い
- 弱いとはいえ、 $1/r^2$ に比例してどこまでも影響する
 - 天文学的スケールで重要になる