

天文現象の見方 — 法則性を認識する

長島 雅裕(長崎大学教育学部)

キーワード:

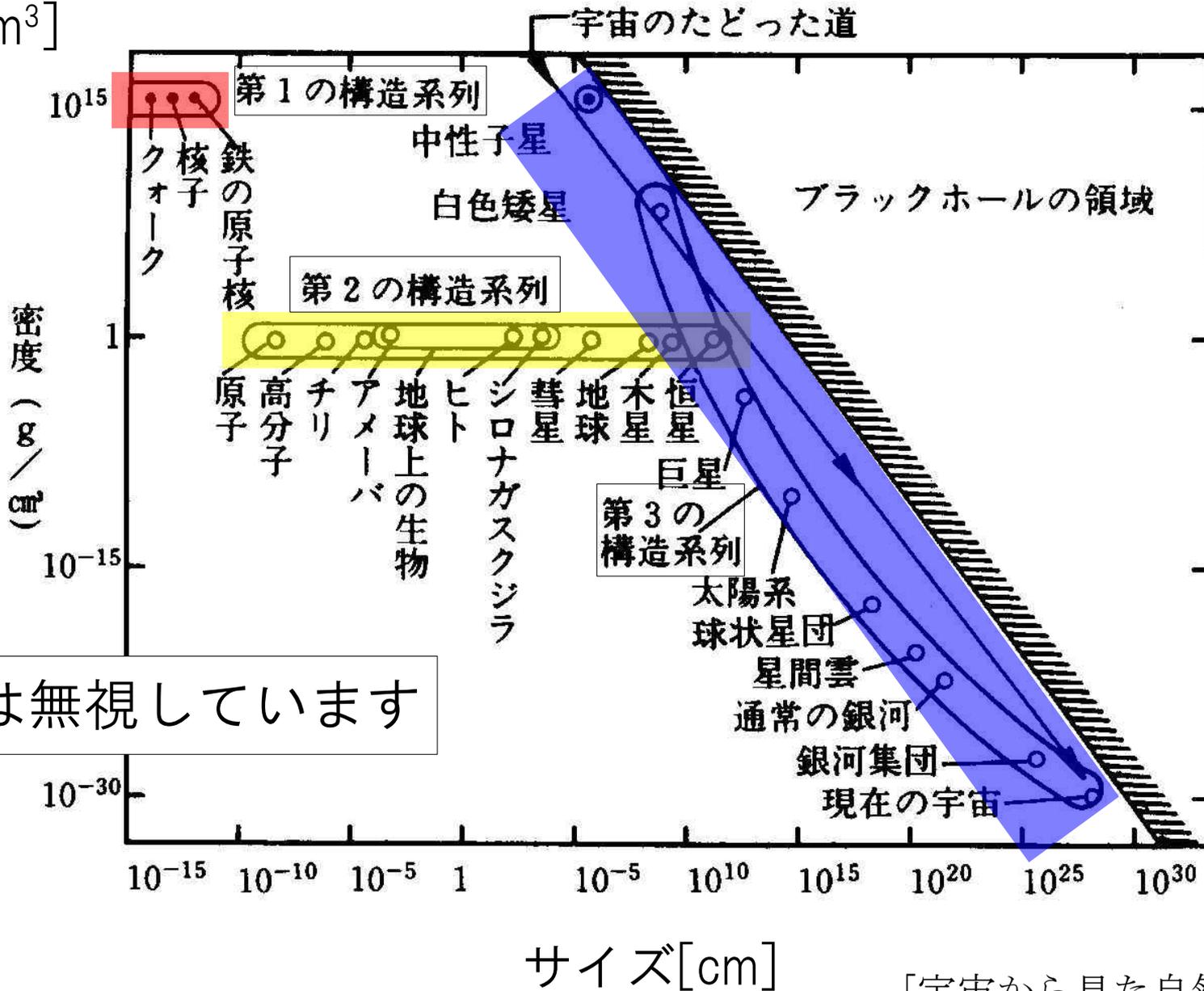
- 重力相互作用
 - 以下「重力」と略。万有引力は重力が弱い場合に成り立つ。
- 回転(遠心力)
- 相対的なものの見方
 - 現象は絶対的(\Leftrightarrow 相対主義)

今日のお話の構成

- 物理学の話
 - 現代天文学は物理学の一分野
 - 天文学の位置づけ
- 重力と回転
- 見かけの運動
- 天文学「で」何を理解できるか・すべきか
 - 天文学「を」、というよりも・・・

自然界における物質の密度とサイズ

密度[g/cm³]



複雑さは無視しています

自然界における4つの力(相互作用)

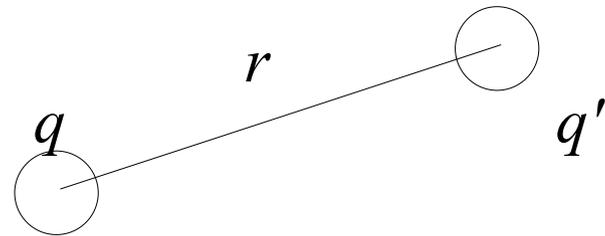
- **強い相互作用** (第1の構造系列)
 - 核力の源 (湯川秀樹)、原子核反応
 - 原子核を固める . . . 陽子同士は電氣的には反撥するが、それよりも強い力で引き付ける
- **電磁相互作用** (第2の構造系列)
 - 電気、磁気の源、化学反応
- **重力相互作用** (第3の構造系列)
 - 正の質量しかないので、長距離で重要
- **弱い相互作用** (構造は作らない)
 - β 崩壊を引き起こす

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

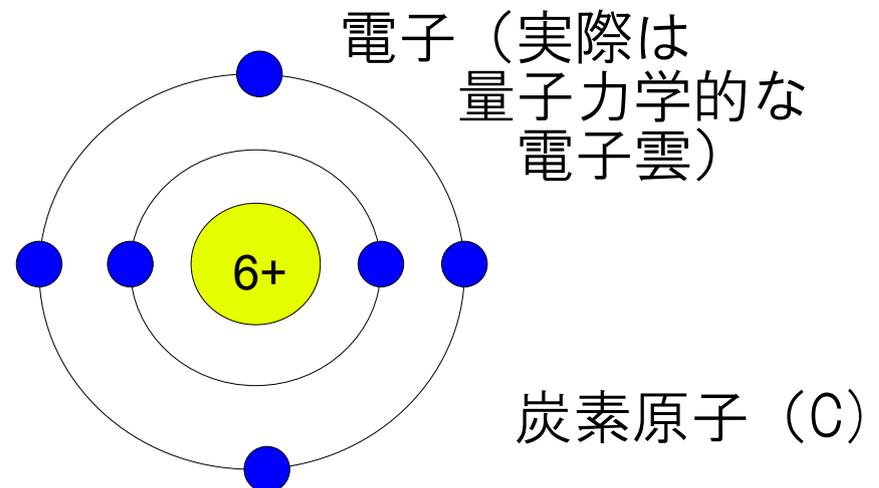
- 原子の大きさ

- 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

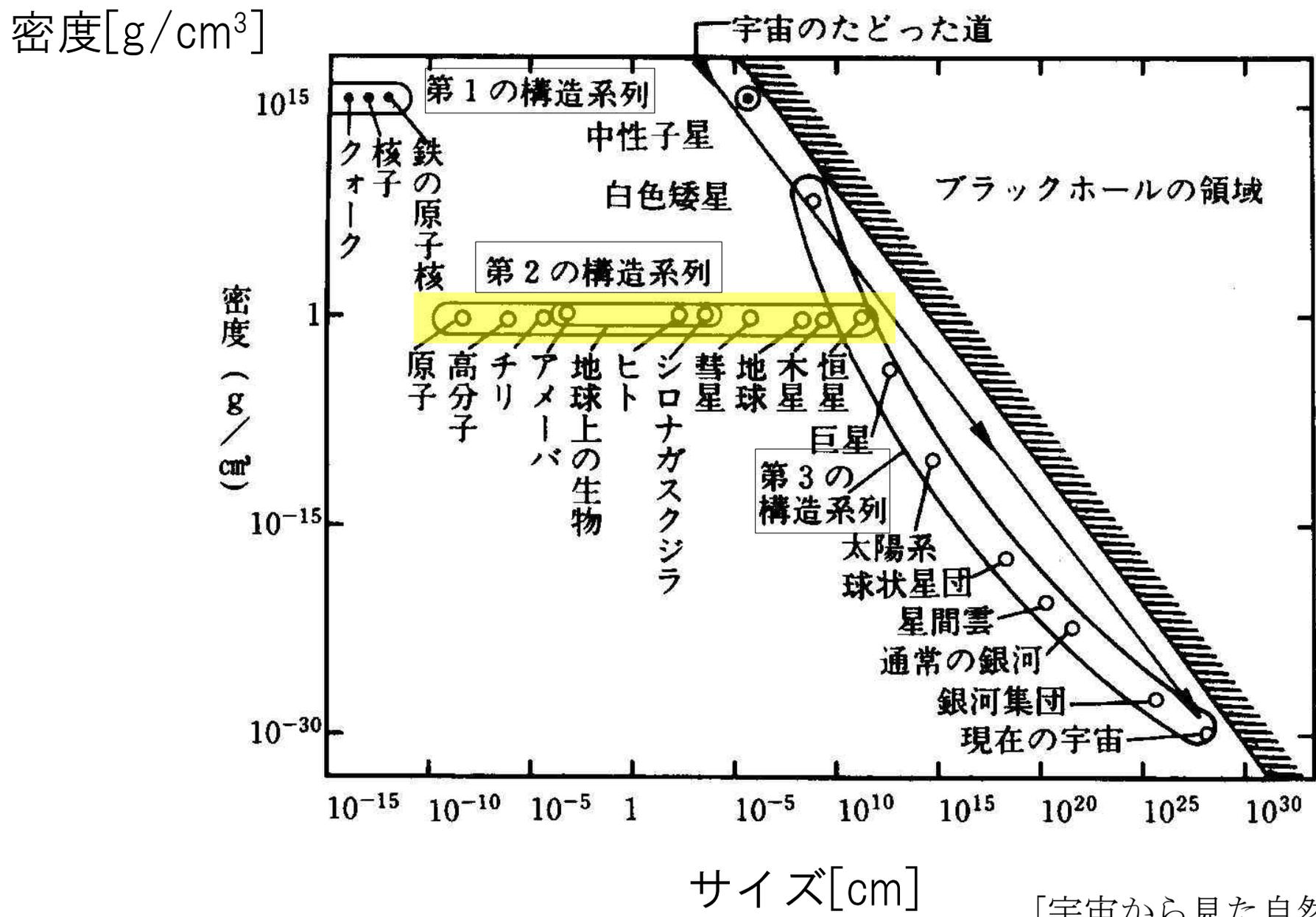
- 日常世界の「積み木」



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



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種類のクォークが予言された→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
 - 湯川秀樹が予言、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⇔中間子の質量**

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

RIBF による原子核ワールドの拡張

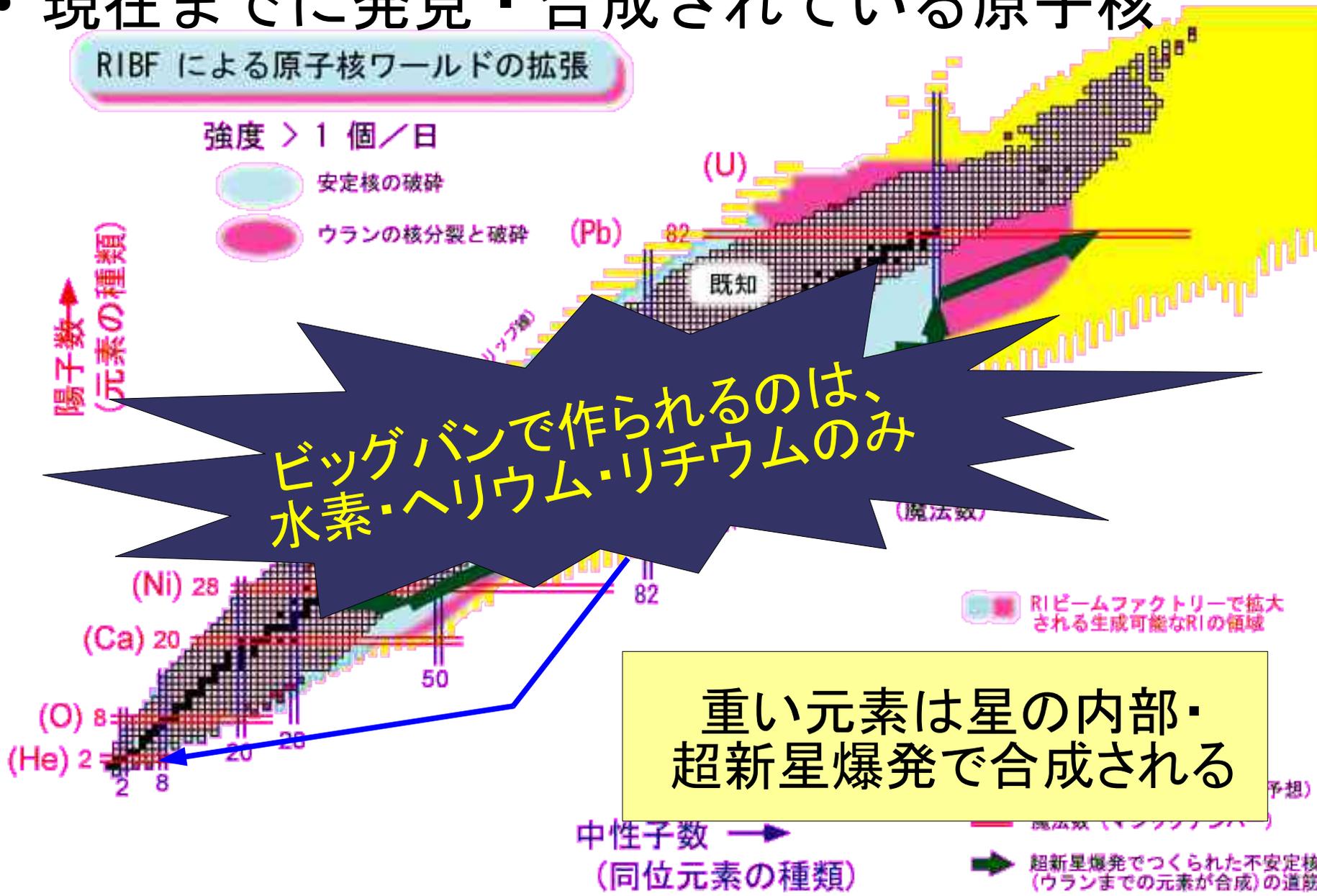
強度 > 1 個/日

安定核の破砕

ウランの核分裂と破砕

陽子数
(元素の種類)

ビッグバンで作られるのは、
水素・ヘリウム・リチウムのみ



RIBFで拡大される生成可能なRIの領域

重い元素は星の内部・
超新星爆発で合成される

中性子数
(同位元素の種類)

超新星爆発でつくられた不安定核 (ウランまでの元素が合成) の道筋

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 $\Delta E = \Delta m c^2$

– 二酸化炭素1mol 当たり 4×10^5 [J] 生成 $C + O_2 \rightarrow CO_2$

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

– $4\text{H} \rightarrow \text{He}$ 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、

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

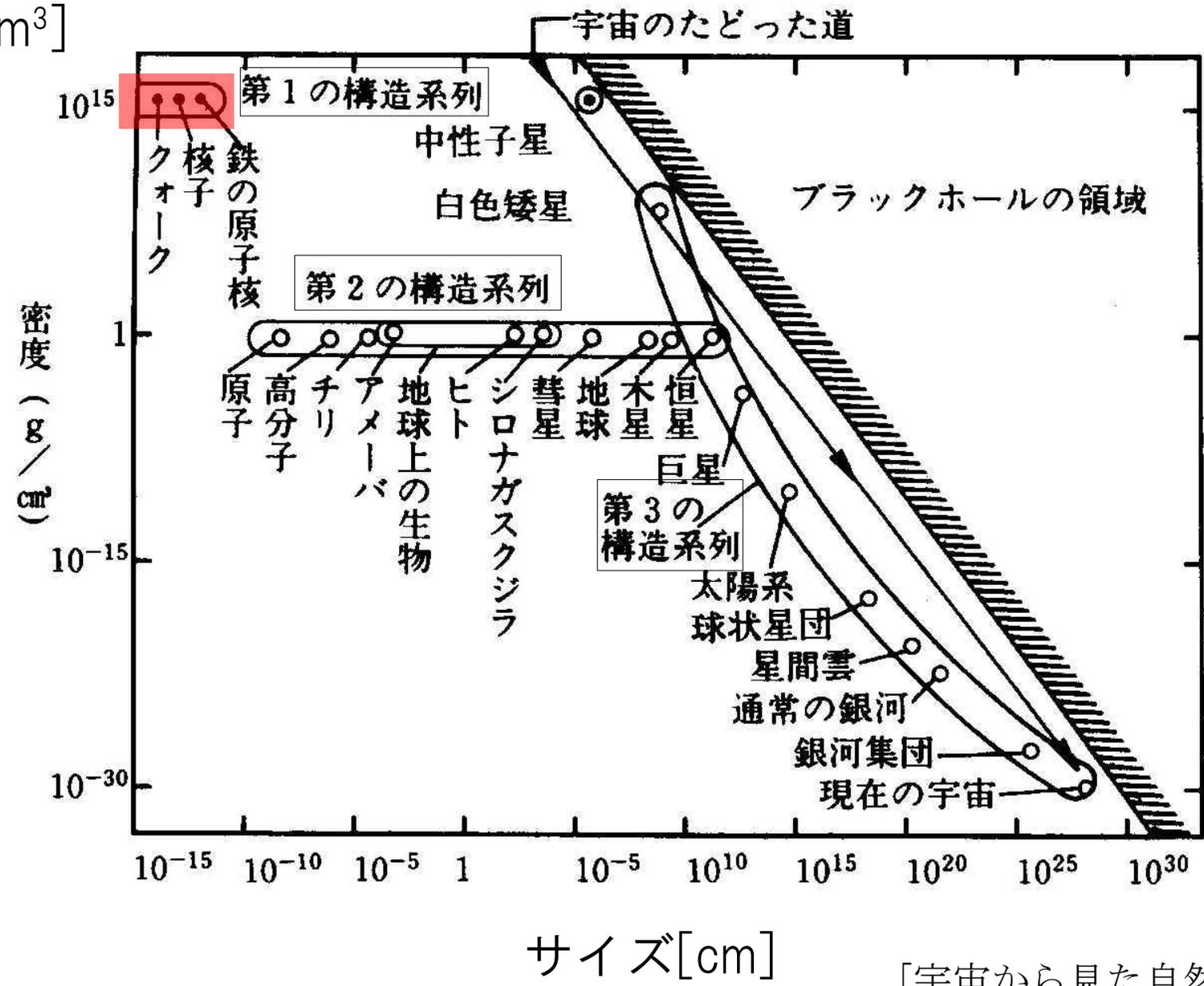
$$\simeq \frac{7 \times 10^{-4} \times 2 \times 10^{30} [\text{kg}] \times (3 \times 10^8 [\text{m/s}])^2}{4 \times 10^{26} [\text{W}]} \simeq 3.1 \times 10^{17} [\text{s}]$$

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

→ 100億年

自然界における物質の密度とサイズ

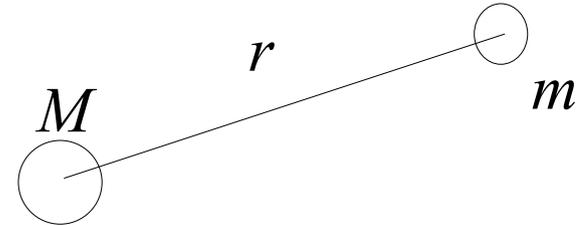
密度[g/cm³]



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) × 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

log(密度) [kg/m³]

シュバルツシルト半径
(ブラックホールのサイズ)

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

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)

$$p \cdot r \approx h$$

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

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

強い力(核力)

電磁気力
原子の積み重ね

すべての物質は、
この三角形の中に納まり、
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

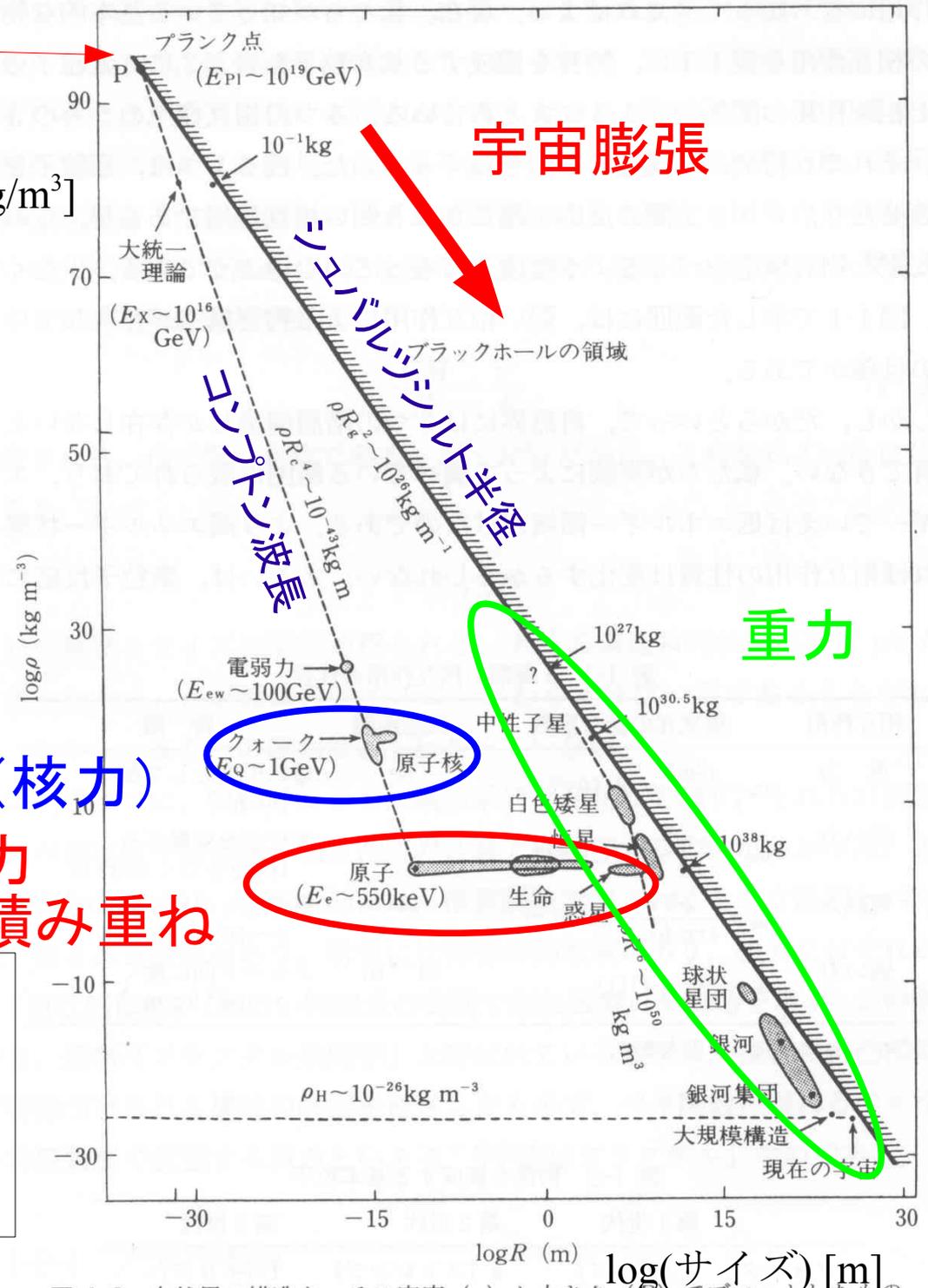


図 1-2 自然界の構造を、その密度 (ρ) と大きさ (R) でプロットしたもの

天文学の位置づけ

- 物理学の知識を駆使し、現実に存在する天体・天文現象を理解する
- 天文現象の理解を通じて、基礎物理へのフィードバックを図る
- そもそも天文学が物理学誕生のきっかけ
 - ケプラー→ニュートン
- ただし、天文に顕著なのは、重力の存在
 - 長距離で重要になる力
- 重力を通して、天文現象を見てみましょう

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

宇宙の膨張

- 宇宙はビッグバン以来、137億年の間、膨張を続けている
- 宇宙の総質量 M , 半径 r , 膨張速度を v とする
- 重力により、膨張速度は遅くなる
 - 投げ上げたボールは、位置エネルギーを獲得し、速度を落とす
- 宇宙の質量により、膨張し続けるか、収縮に転ずるか（=落ちてくる）が決まる
 - 宇宙の進化を表す式（ただし最も簡単な場合）

$$\frac{GM}{r} = \frac{1}{2} v^2$$

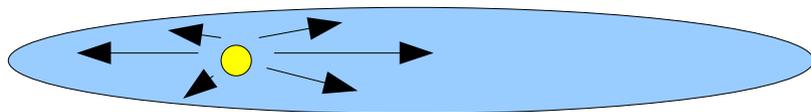
- 実際には「真空のエネルギー」なども絡む

銀河の回転

- 銀河系：約1千億個の星の集団
- 渦巻型（棒渦巻き型？）の銀河
- 宇宙の中では大きめ

おとなりのアンドロメダ銀河

我々の銀河系（内側から見ている）



M31, M32, M110（アンドロメダ大銀河と伴銀河）



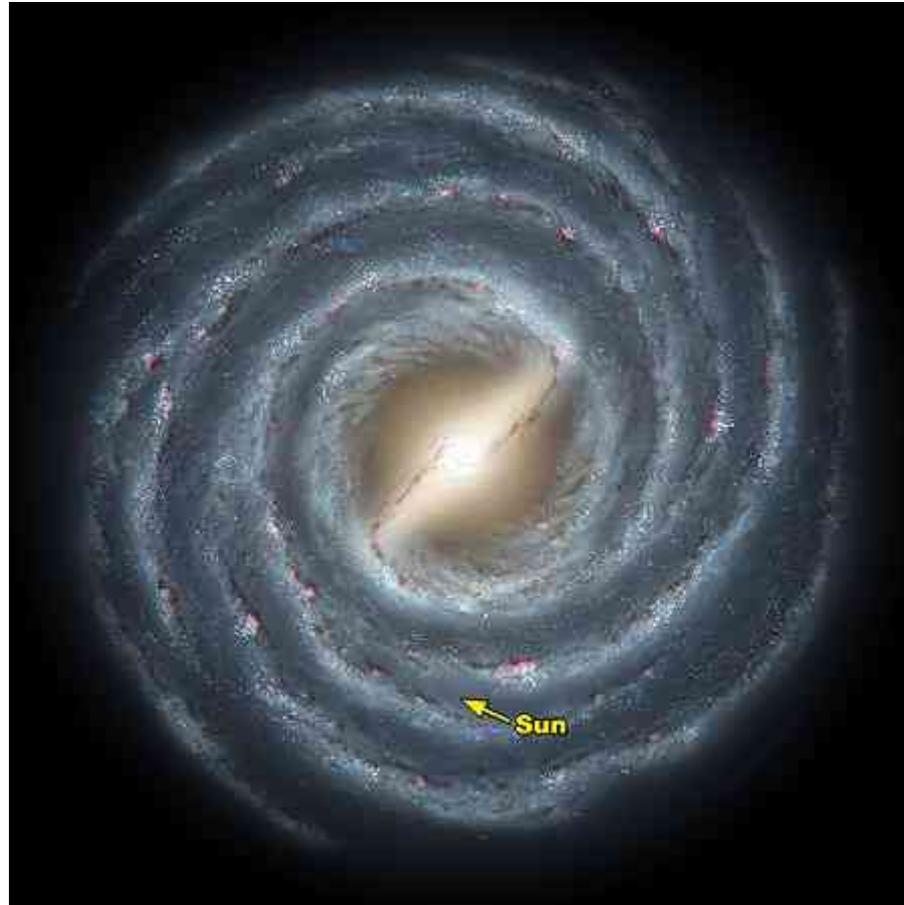
1997年 9月10日, 21時26分 (JST)

焦点距離300mm望遠レンズ (タムロン300mm F2.8LD/絞り開放), 冷却CCDカメラ (MUTOH CV-16)
露出時間: 赤2分×4, 緑4分×4, 青2分×4, フィルタ: R-60, G-533, B-460, S色分解撮像カラー合成画像
画像範囲: 2.58×1.70°, 観測場所: 兼毅コロナ観測所

H. Fukushima 国立天文台 広報普及室



銀河系の想像図



<http://apod.nasa.gov/apod/ap050825.html>

銀河のシミュレーション



もやもや：ガス、白い点々：星
国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト
<http://4d2u.nao.ac.jp/>
シミュレーション：齊藤貴之氏

銀河系の回転

- 我々の銀河系は、約2億年で一周する
- 重力と遠心力の釣り合い $\frac{GM}{r^2} = \frac{v^2}{r}$
- 質量 = 密度 × 体積より、 $M \simeq \rho r^3$
- これより、 $\rho \simeq \frac{v^2}{Gr^2} \propto \frac{v^2}{r^2}$
- 実際の観測では、回転速度 v は半径によらずほぼ一定（「平坦な回転曲線」）
- ところが、光っている星の分布は、半径が増えるにつれ、指数関数的に減少
- つまり、「見えない物質」 = ダークマターの存在を示唆

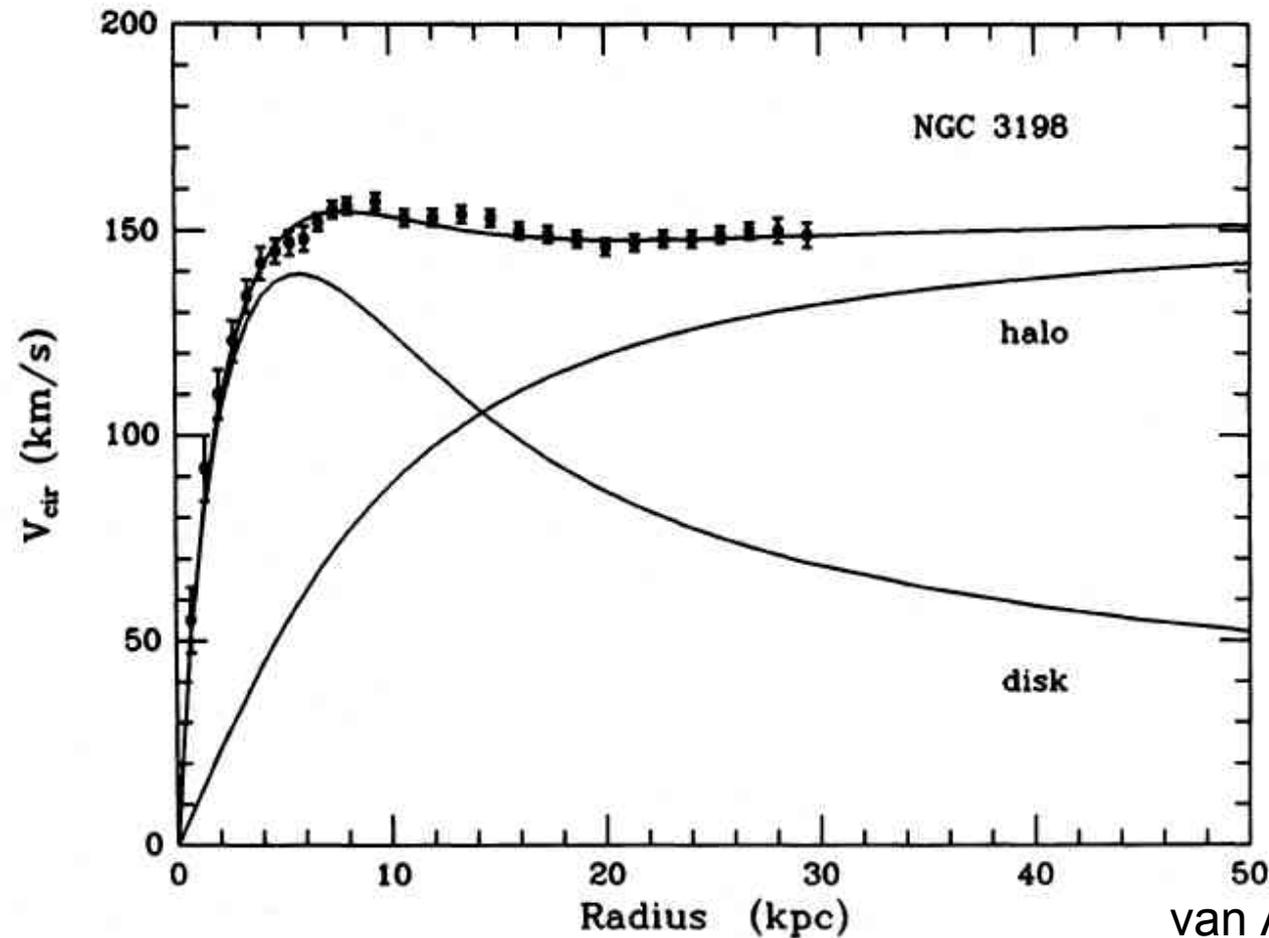
回転曲線とダークマター

- 単純な原理（重力＝遠心力）からダークマターの存在を導くことができる

No. 2, 1985

DISTRIBUTION OF DARK MATTER IN NGC 3198

309



van Albada et al. (1985)

FIG. 4.—Fit of exponential disk with maximum mass and halo to observed rotation curve (dots with error bars). The scale length of the disk has been taken equal to that of the light distribution ($60''$, corresponding to 2.68 kpc). The halo curve is based on eq. (1), $a = 8.5$ kpc, $\gamma = 2.1$, $\rho(R_0) = 0.0040 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$.

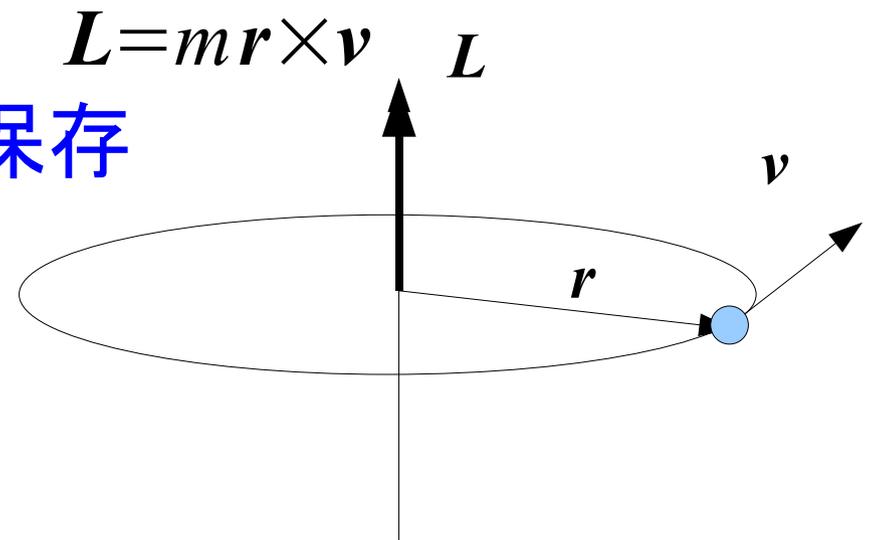
惑星の回転(公転)

- 円軌道と仮定 (簡単のため)
- 力の釣合 (重力=遠心力) $\frac{GM}{R^2} = \frac{v^2}{R}$
 - 向心加速度=重力でも同じ
 - 誰を中心として見るかの違い (太陽か地球か)
- 円軌道なので等速回転、周期 T は $T = \frac{2\pi R}{v}$
- まとめると $T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} R^3$
 - **ケプラーの第3法則**
- より安直には、運動方程式 $ma=F$ を眺め、加速度が大体 $a \doteq R/T^2$ であることから、 $T^2 \propto R^3$ を導ける
- ちなみに**第2法則は角運動量保存則**から。

回転

- ここまで「回転」と気楽に言ってきたけれども・・・回転とはそもそもなんだろうか
- 回っている物体は、「回り具合」を一定にしようとする
 - 「回り具合」 = 「角運動量」
 - だいたい角運動量 = 質量 × 腕の長さ × 速度
 - 角運動量の保存

⇔ エネルギー、運動量の保存



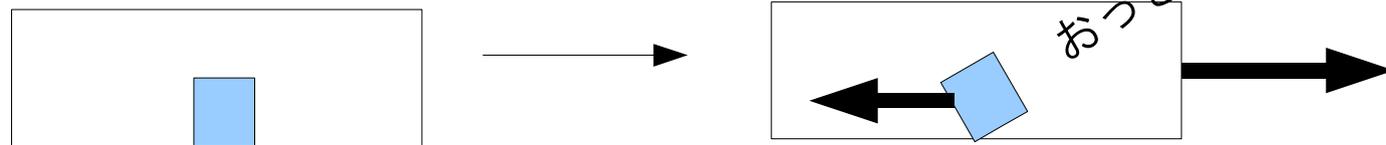
- 自転車が倒れない理由

回転する物体のサイズ

- 腕の長さが短くなると、埋め合わせのため速く回る
 - フィギュアスケートのスピン
- 天体が収縮すると、速く回る
 - 星間空間の分子雲（ガス）が自己重力により収縮すると、回転が速くなる
- 惑星が中心星（太陽）に近づこうとすると、速く公転する
 - 遠心力が増し、遠ざかろうとする
 - したがって、落っこちずに安定して軌道上を公転する

遠心力

- 回っている物体に働く「見かけの」力 $F = \frac{mv^2}{r}$
- 「見かけ」とはどういう意味？
 - 実際にはそんな力は働いていない
 - 中心に引っ張る力のみ → 中心向きの加速度
- 加速度があると力が働いているように見える
 - 運動方程式 $ma = F$ より $F = ma$ という力
 - 動き出す・ブレーキをかけた電車内



急に発進すると . . .

遠心力

- 回っている＝中心から加速度を受け、「落っこち続けている」
- 等速円運動も加速度運動
 - 見かけの力が生じる
- で、「見かけ」とは？
 - 運動している人から見た時に感じる力
 - 相対的なものの見方をする必要がある
- 等速円運動の場合、向心力＝遠心力の釣合

スペースシャトルの無重力状態

- 人工衛星軌道でなぜ無重力状態になるか？
- シャトルは地上約500kmを飛んでいる
- そこでの重力加速度は？
 - 地上の重力加速度を g , シャトル軌道で g' とする
 - 地球の質量を M , 半径を R , 軌道の高さを h
 - 地表では $g = \frac{GM}{R}$ 、軌道上では $g' = \frac{GM}{R+h}$
 - 比を取ると、
$$\frac{g'}{g} = \frac{R}{R+h} = \frac{1}{1+h/R}$$
 - $h=500\text{km}$, $R=6400\text{km}$ なので、1割も変わらない！
 - 全然無重力じゃない 落ち続けるエレベーターと同じ
 - 無重力なのは、遠心力が働いているため

コリオリ力：回転と見かけの力2

- 回転している物体上で運動すると・・・
- 反時計回りに回っている物体上では、時計回りに「見かけの力」が働く→コリオリ力
- 「回転していない系」に自分がいると思うと、そのように見える
- 台風の回る向き
- フーコーの振り子
- 加速度のある系（非慣性系）では見かけの力が発生する



天動説と地動説

- 「地球が宇宙の中心」 → 「地球は太陽のまわりを回っている」 ・ ・ ・ 宇宙観の変遷
- しかし、「中心」とは一体なんなのか？
- 煩雑になるけれども、地球を固定した太陽・惑星の軌道を描くことは可能
 - 太陽は地球のまわりを回り、他の惑星は、地球の周りを回る太陽のまわりを回る
- また、太陽は銀河中心のまわりを回っている
- では、天動説と地動説の違いに意味はない？
 - これは悪しき相対主義
- （例えば）重心から見よう

天動説と地動説

- 今度は太陽の運動も考える

- 地球の運動 $mr\omega^2 = \frac{GMm}{a^2}$

- 太陽の運動 $MR\omega^2 = \frac{GMm}{a^2}$

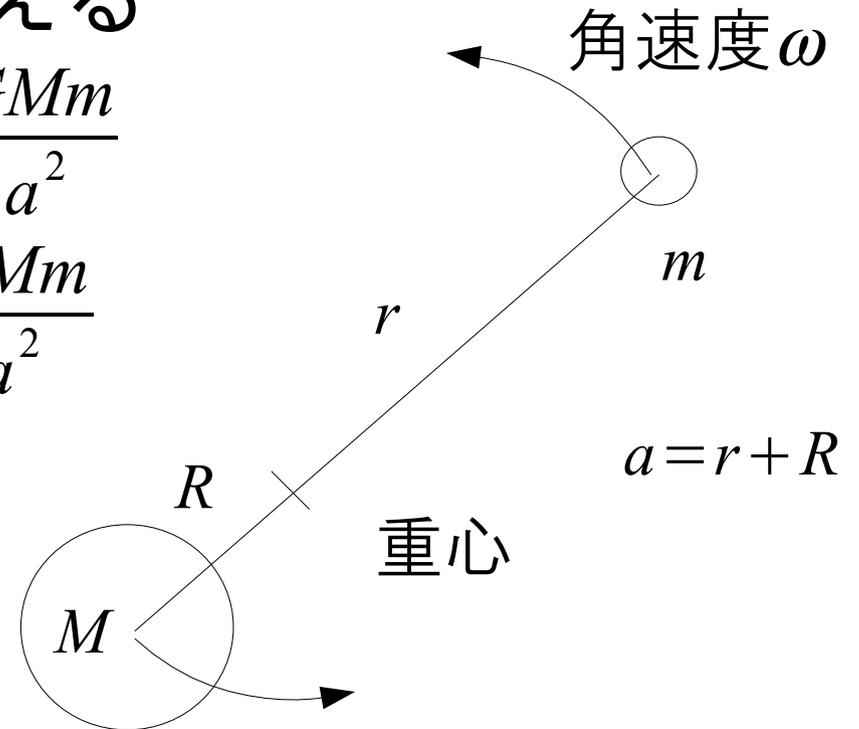
- 角速度は（当然）共通

- 運動速度は $v=r\omega, V=R\omega$

- すると、
$$v^2 = \frac{GMr}{a^2}, \quad V^2 = \frac{GmR}{a^2}$$

- **太陽はほとんど動かない**

- **地球が太陽のまわりを回っている**と考えるのが自然 ← 軌道運動だけで見るのではなく



ほんのちょっと動く。
太陽系外惑星発見法の原理

運動の錯覚と公転運動

- 肉眼観察だけでは天動説と認識するのが自然
 - 1000年以上にわたる膨大な考察と望遠鏡の発明が地動説確立には必要だった
 - 年周光行差はあるけれども…（高校レベル）
- 明確な論理で教える必要

運動の錯覚と日周運動

- 窓から外を眺める
- 窓が動いているのか、亀が動いているのか？
- これだけでは、区別のしようがない



- 区別をするには？
 - 奥行きの情報が必要→電車の向こうのホーム
 - ⇔年周視差
- しかし恒星の位置の奥行きは肉眼ではわからない

運動の錯覚と日周運動

- 肉眼では天球が回っているのか地球が自転しているのかわからない
- 誰かが教えてあげなければ、自転の認識はできない
- 論理的でクリアなイメージを持たせることが（おそらく）重要

法則性の認識と天文学

- 状況

- 初等・（前期）中等教育における天文学と、研究現場での天文学の乖離は大きい
- 例えば：物理で習う「等速直線運動」は、現代物理学の最先端でも重要な概念
- 一方：9/26-28に開催された日本天文学会秋季年会で、「東方・西方最大離角」について何人かに聞いてみた。「あー、なんか昔習ったような・・・」「なつかしー、で、なんだっけ？」
- つまり、他の分野と違って、最先端の天文学とのつながりが薄い

法則性の認識と天文学

- 天文学の果たすべき役割は？
- （色々あるだろうけれども）一つには論理的な自然認識を深めるための良い練習問題になっている
- （例えば）日常生活では等速直線運動はほとんどない。「動き続ける物体は力が働き続けている」というニュートン以前の自然観のほうが自然に見える。
 - 何に注目するかではなく、「摩擦は本質でない」というように、「何を無視してよいか・するべきか」に注目したニュートンの偉大さ
- 天文現象の多くは、素朴な物理法則そのもので記述できる。

法則性の認識と天文学

- 物理法則のエッセンスが認識できるような、また心理学的な錯覚との関連を通して、「現象の絶対性」と「認識の相対性」に気づくことができるとができるような、よい練習問題を与えられるのではないか？
- 科学的なものの見方・考え方を訓練するという観点から天文学を捉えると、いろいろと有用なのではないだろうか？
- （何かと縛りはあるでしょうけれども）科学リテラシーの基礎力をつけるという意味でも複雑な現実よりは逆にわかりやすいかも…

まとめ

- 物理学における現代天文学の位置づけ
- 重力（万有引力）が天体／天文現象理解のキーポイント
- 重力と回転の釣合で決まることが多い
- 回転という加速度運動にまつわる見かけの運動
- 見かけと錯覚