

「元素誕生のからくり」

本林 透(理研)

宇宙で
原子核が組み変わって(反応して)様々な元素が..
これが授業の主題

科目コード	D0437
講座名	元素誕生のからくり
定員数	24名
担当者	本林 透(もとばやし とおる)

講義の目的および概要

我々のまわりにある様々な元素は、いつ、どこで生まれたのだろうか。今も作られているのだろうか。その鍵は原子核にある。原子核は原子の中心にある極く小さな粒子で、宇宙の中で元素が誕生する時に重要な役割を果たしている。元素の合成は、太陽などの恒星が輝く仕組み、星の一生、中性子星の合体減少、宇宙の進化にも関係する。授業では、元素の合成と原子核について理解を深め、原子核のような微小な世界で働く一見不思議な仕組みについても紹介する。キーワードは、宇宙の歴史、原子核、星の進化、気体と温度、核反応、トンネル効果、超新星、爆発的要素合成、中性子星。

※理化学研究所(和光市)の見学会を予定している。適当なものがあれば講演会徴候も行いたい。このような企画にも興味を持ち、積極的に参加する諸君の履修を望む。

元素 --- 概念(種類 - 水素、鉄、ウラン...)
原子 --- 実体(個、"ウランの原子")
原子核

<http://ribf.riken.jp/~motobaya/lectures/Niiza/index.html>

物理学70の不思議

<http://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/70wonders.php>

- 16. 原子核の形
- 19. 格子QCD
- 5. 素粒子の世代
- 13. 陽子ニクォーク3つ?
- 11. ヒッグス粒子
- 37. 素粒子と物性
- 36. 量子コンピュータ
- 14. テトラクォーク
- 18. 原子核の地図
- 38. モンテカルロ計算
- 53. フェルミ液体論
- 17. 超重原子核
- 10. クォークの閉じこめ
- 6. ニュートリノ
- 45. 光誘起相転移
- 41. トポロジカル秩序
- 4. クォーク・グルーオン・プラズマ
- 39. マヨラナ粒子
- 49. 物質設計
- 30. 乱流
- 44. メタマテリアル
- 15. ストレンジ原子核
- 8. 暗黒エネルギー
- 34. 量子力学の検証
- 55. 隠れた秩序
- 12. 反物質
- 7. 暗黒物質
- 1. 宇宙のはじまり
- 48. 極限環境
- 46. 界面
- 51. 超伝導
- 21. 中性子星
- 2. 4次元時空
- 3. インフレーション
- 52. 銅酸化物高温超伝導
- 33. 冷却原子
- 29. 核融合
- 20. 恒星
- 50. 金属と絶縁体
- 57. 統計力学の基礎
- 9. 宇宙の物質生成
- 27. 太陽コロナ
- 60. ガラス
- 58. 非平衡状態
- 47. スピントロニクス
- 24. 相対論的ジェット
- 56. 量子と古典
- 54. スピン・軌道相互作用
- 59. 可積分系
- 22. 超大質量ブラックホール
- 25. 宇宙線
- 35. 量子通信
- 65. タンパク質
- 32. 原子時計
- 43. 超短パルスレーザー
- 23. ブラックホールと情報
- 67. 分子機械
- 61. 粉体
- 63. 生物の運動
- 42. 観るの極み
- 70. 物理学はどこへ?
- 64. シマウマの縮
- 66. 電子と生命
- 40. 還元と創発
- 62. 経済物理
- 69. 私立教新座物理
- 68. 物理と生命

物理学70の不思議

<http://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/70wonders.php>

- 16. 原子核の形
- 19. 格子QCD
- 5. 素粒子の世代
- 13. 陽子ニクォーク3つ?
- 11. ヒッグス粒子
- 37. 素粒子と物性
- 36. 量子コンピュータ
- 14. テトラクォーク
- 18. 原子核の地図
- 6. ニュートリノ
- 38. モンテカルロ計算
- 53. フェルミ液体論
- 17. 超重原子核
- 10. クォークの閉じこめ
- 39. マヨラナ粒子
- 45. 光誘起相転移
- 41. トポロジカル秩序
- 4. クォーク・グルーオン・プラズマ
- 26. 磁場の起源
- 49. 物質設計
- 30. 乱流
- 44. メタマテリアル
- 15. ストレンジ原子核
- 8. 暗黒エネルギー
- 34. 量子力学の検証
- 55. 隠れた秩序
- 12. 反物質
- 7. 暗黒物質
- 1. 宇宙のはじまり
- 48. 極限環境
- 46. 界面
- 51. 超伝導
- 21. 中性子星
- 2. 4次元時空
- 3. インフレーション
- 43. 銅酸化物高温超伝導
- 31. 量子電磁力学
- 33. 冷却原子
- 29. 核融合
- 20. 恒星
- 50. 金属と絶縁体
- 57. 統計力学の基礎
- 9. 宇宙の物質生成
- 27. 太陽コロナ
- 60. ガラス
- 58. 非平衡状態
- 47. スピントロニクス
- 24. 相対論的ジェット
- 22. 超大質量ブラックホール
- 56. 量子と古典
- 54. スピン・軌道相互作用
- 59. 可積分系
- 25. 宇宙線
- 35. 量子通信
- 65. タンパク質
- 32. 原子時計
- 43. 超短パルスレーザー
- 23. ブラックホールと情報
- 67. 分子機械
- 61. 粉体
- 63. 生物の運動
- 42. 観るの極み
- 70. 物理学はどこへ?
- 64. シマウマの縮
- 66. 電子と生命
- 40. 還元と創発
- 62. 経済物理
- 69. 私立教新座物理
- 68. 物理と生命

物理学70の不思議



<http://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/70wonders.php>

16. 原子核の形

19. 格子QCD

5. 素粒子の世代

13. 陽子=クォーク3つ?

11. ヒッグス粒子

37. 素粒子と物性

36. 量子コンピュータ

14. テトラクォーク

18. 原子核の地図

38. モンテカルロ計算

53. フェルミ液体論

17. 超重原子核

10. クォークの閉じこめ

6. ニュートリノ

45. 光誘起相転移

41. トポロジカル秩序

4. クォーク・グルーオン・プラズマ

39. マヨラナ粒子

30. 乱流

44. メタマテリアル

15. ストレンジ原子核

8. 暗黒

12. 反物質

7. 暗黒物質

21. 中性子星

2. 4次元時空

33. 冷却原子

29. 核融合

9. 宇宙の物質生成

27.

24. 相対論的

22. 超大質量ブラックホール

25. 宇宙線

23. ブラックホール

70. 物理学

6.



巨大ブラックホールの「影」

太陽質量の65億倍? 普通のは2倍以下

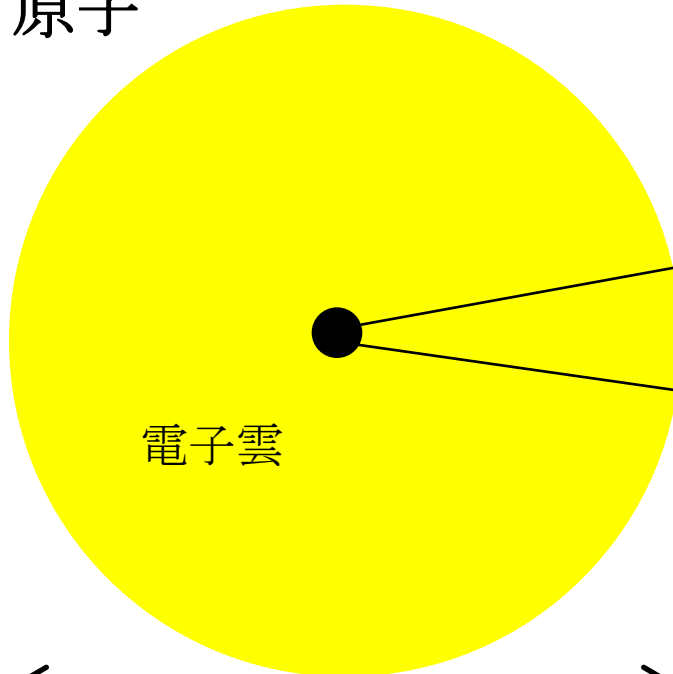
2019年4月

6つのポイント（1学期おさらい）

1. 元素と原子核 陽子の数が元素を決める
2. 宇宙の歴史 ビックバンから約140億年続く膨張
3. 星の進化 原子核が燃えて重いと超新星爆発
4. 原子核の反応 断面積とは
5. 気体と温度 粒子の平均エネルギーは kT
6. 宇宙での元素の合成 ビックバン直後と星の中心
超新星、中性子合体.....

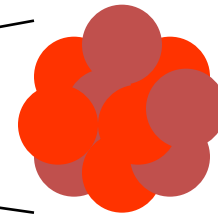
* 順不同

原子



電子雲

原子核



陽子

中性子

約数100兆分の1メートル
(10^{-15} m)

小さすぎて、見えない(今のところ?)

約100億分の1メートル
(10^{-10} m)

陽子、中性子の重さ: 電子の重さの約 2000 倍!
原子の重さ ~ 原子核の重さ

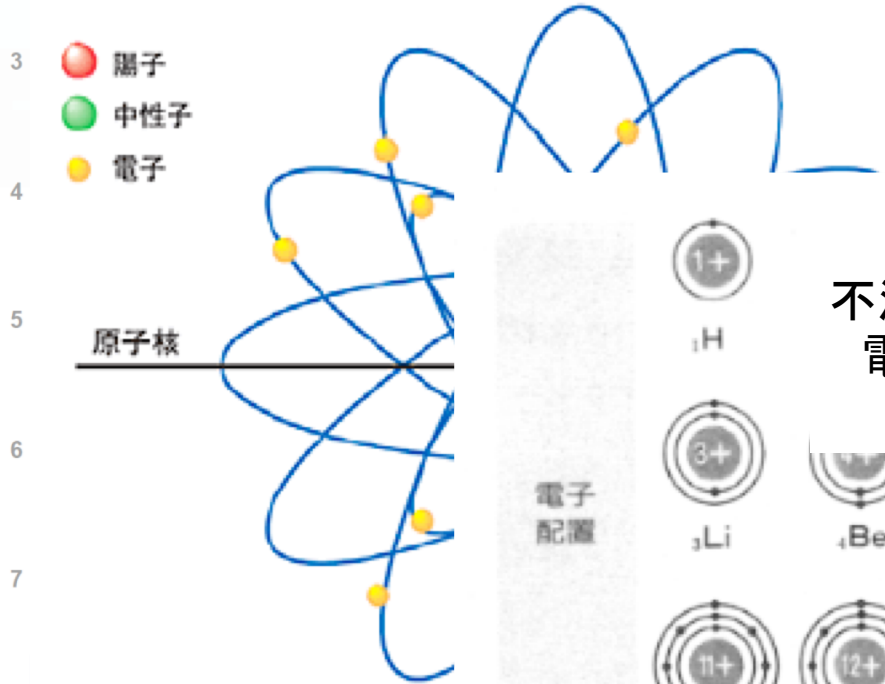
物質の重さ ~ 原子核の重さ

世界は原子核でできている! ?

元素の周期律

原子の性質 ↔ 電子の数
 ↔ (原子核中の)陽子の数

原子番号



不活性気体(安定-電子がとれにくい)
 電子が軌道を満たす(魔法数)
 2, 10, 18,

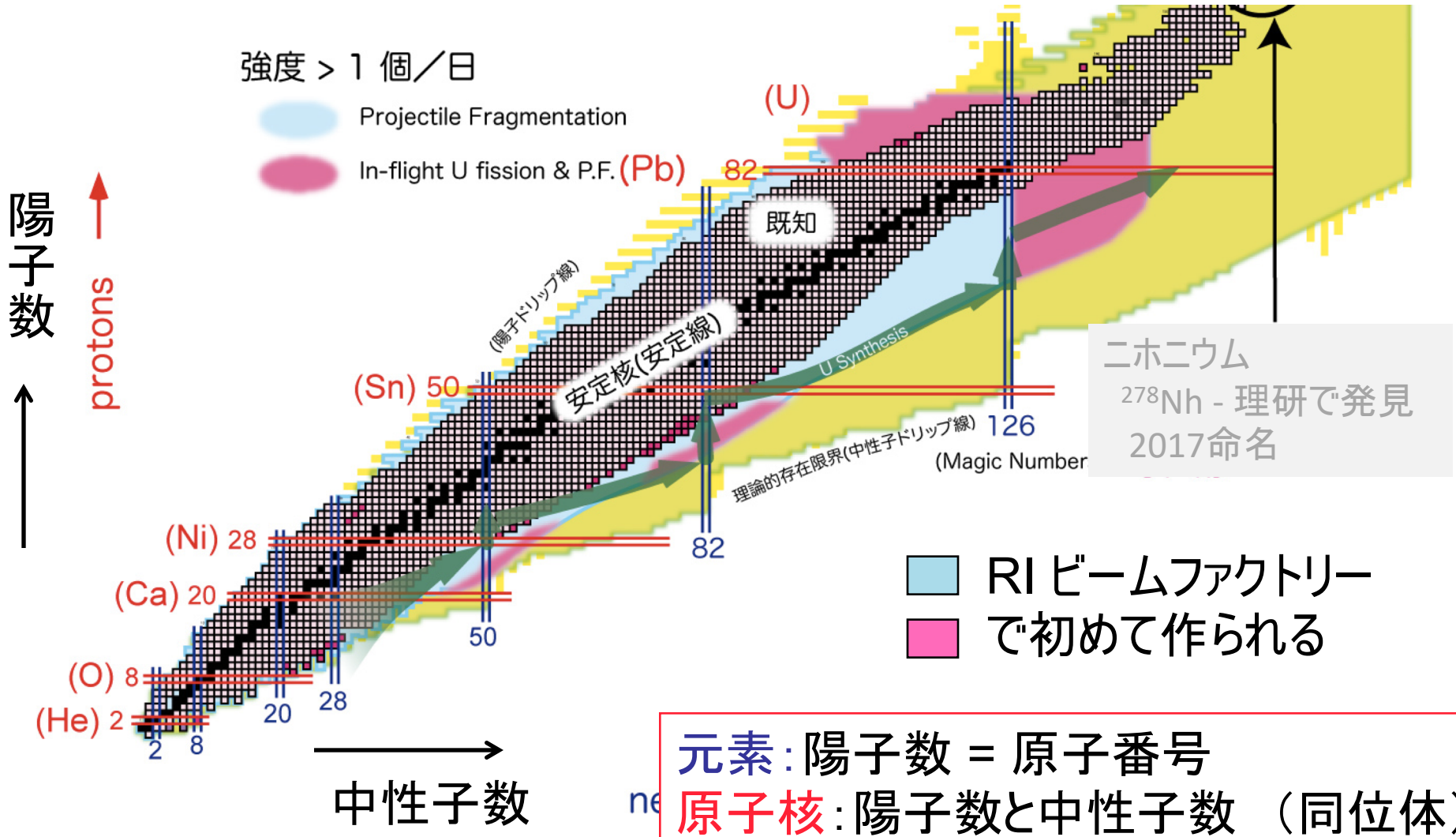


核図表 - 原子核の周期律表

安定な原子核: 約 300

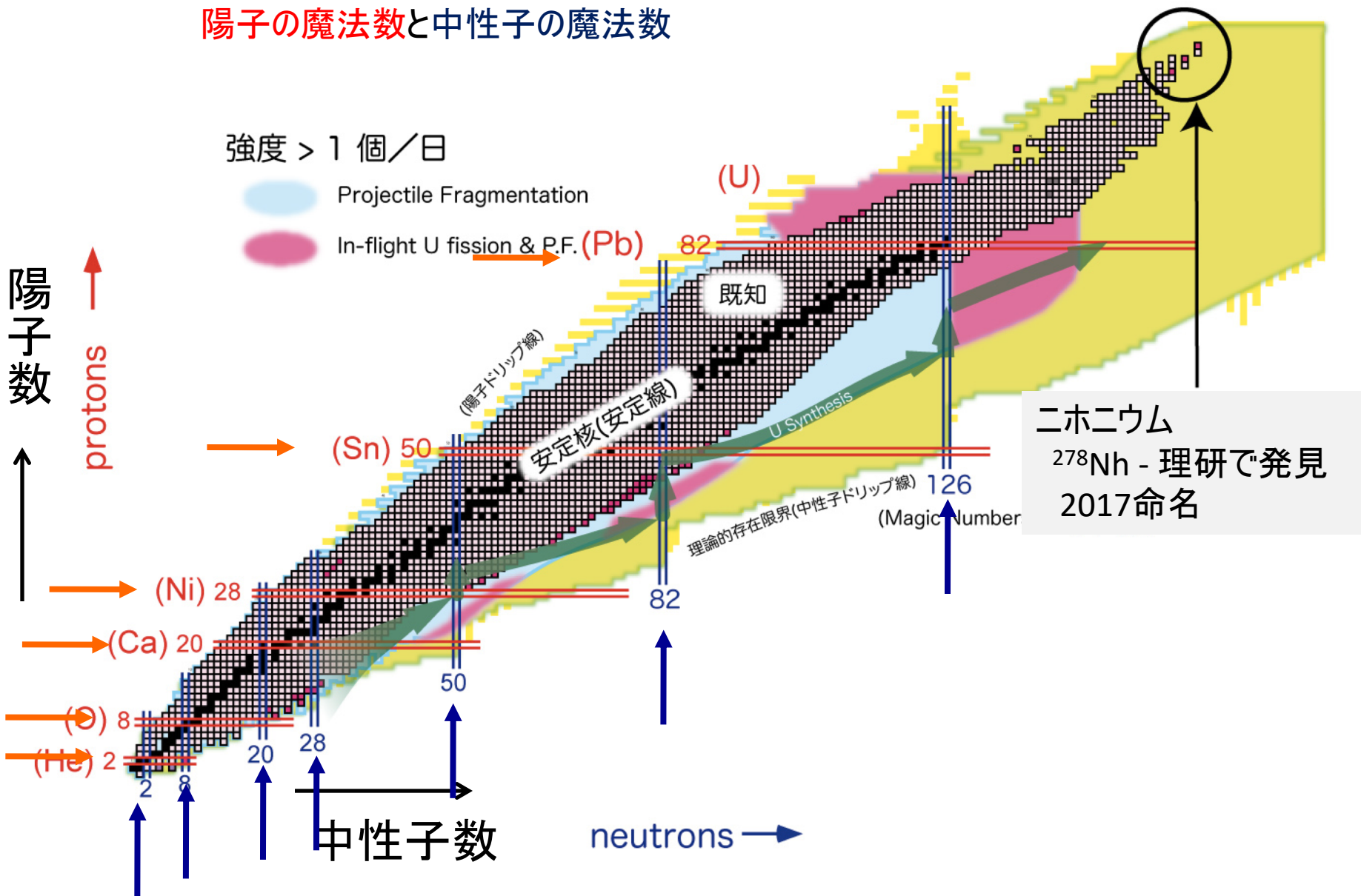
これまでに見つかった原子核: 約 3,000 (不安定 - 放射線を出して安定核へ)

存在が予言されている原子核: 約 10,000



原子と原子核

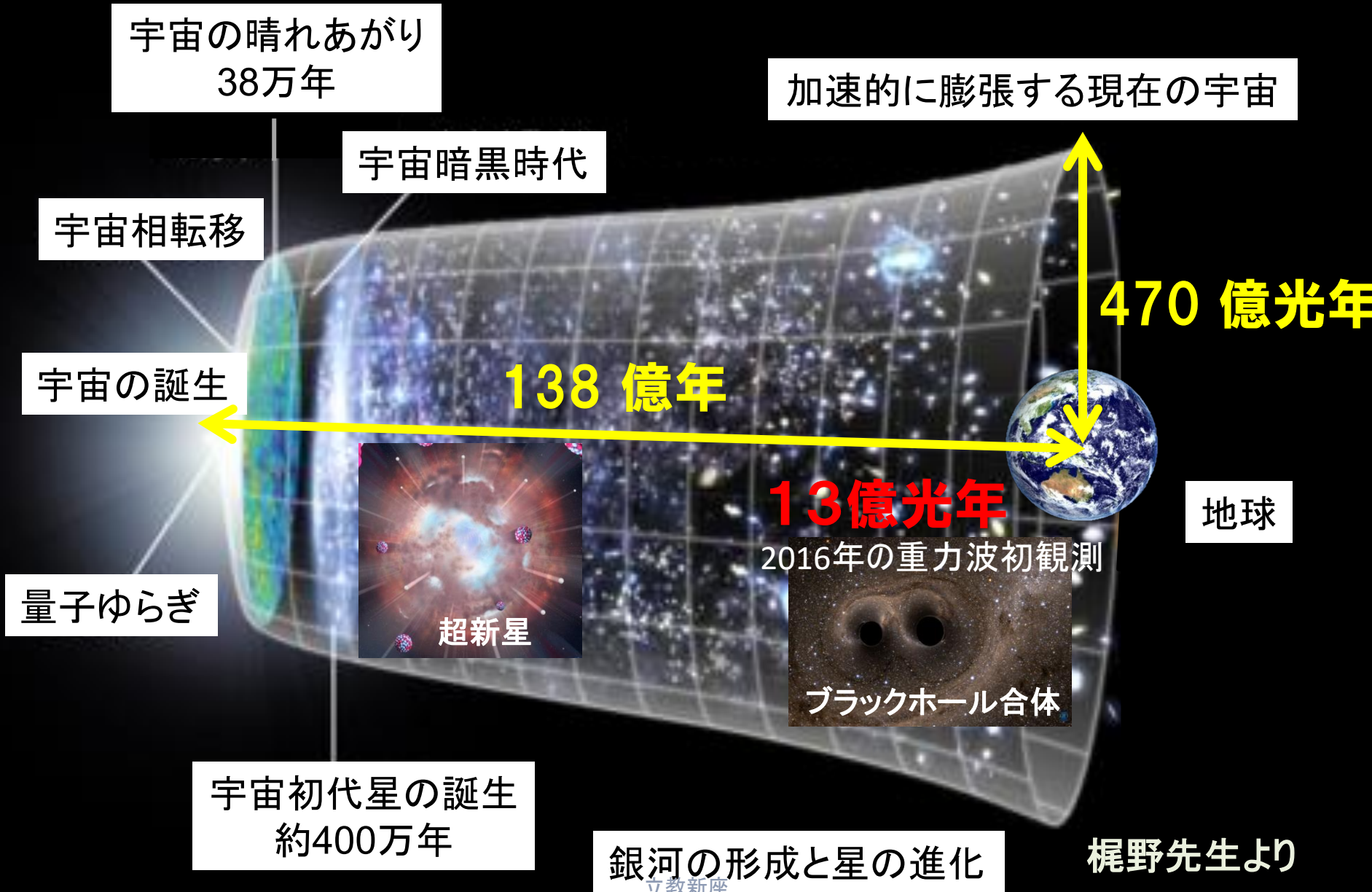
陽子の魔法数と中性子の魔法数



6つのポイント（1学期おさらい）

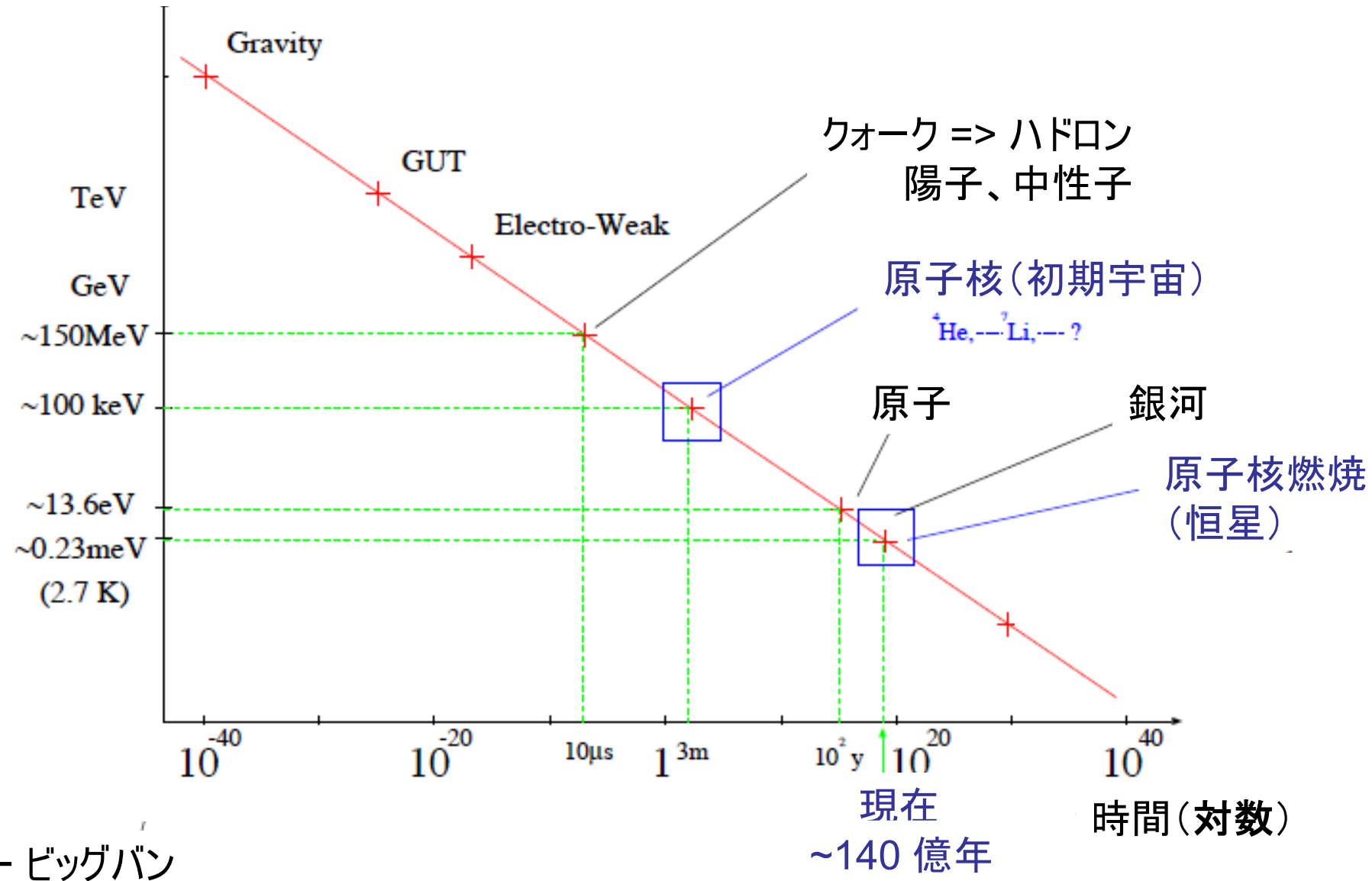
1. 元素と原子核 陽子の数が元素を決める
2. 宇宙の歴史 ビックバンから約140億年続く膨張
3. 星の進化 原子核が燃えて重いと超新星爆発
4. 原子核の反応 断面積とは
5. 気体と温度 粒子の平均エネルギーは kT
6. 宇宙での元素の合成 ビックバン直後と星の中心
超新星、中性子合体.....

* 順不同



宇宙の膨張と平均温度

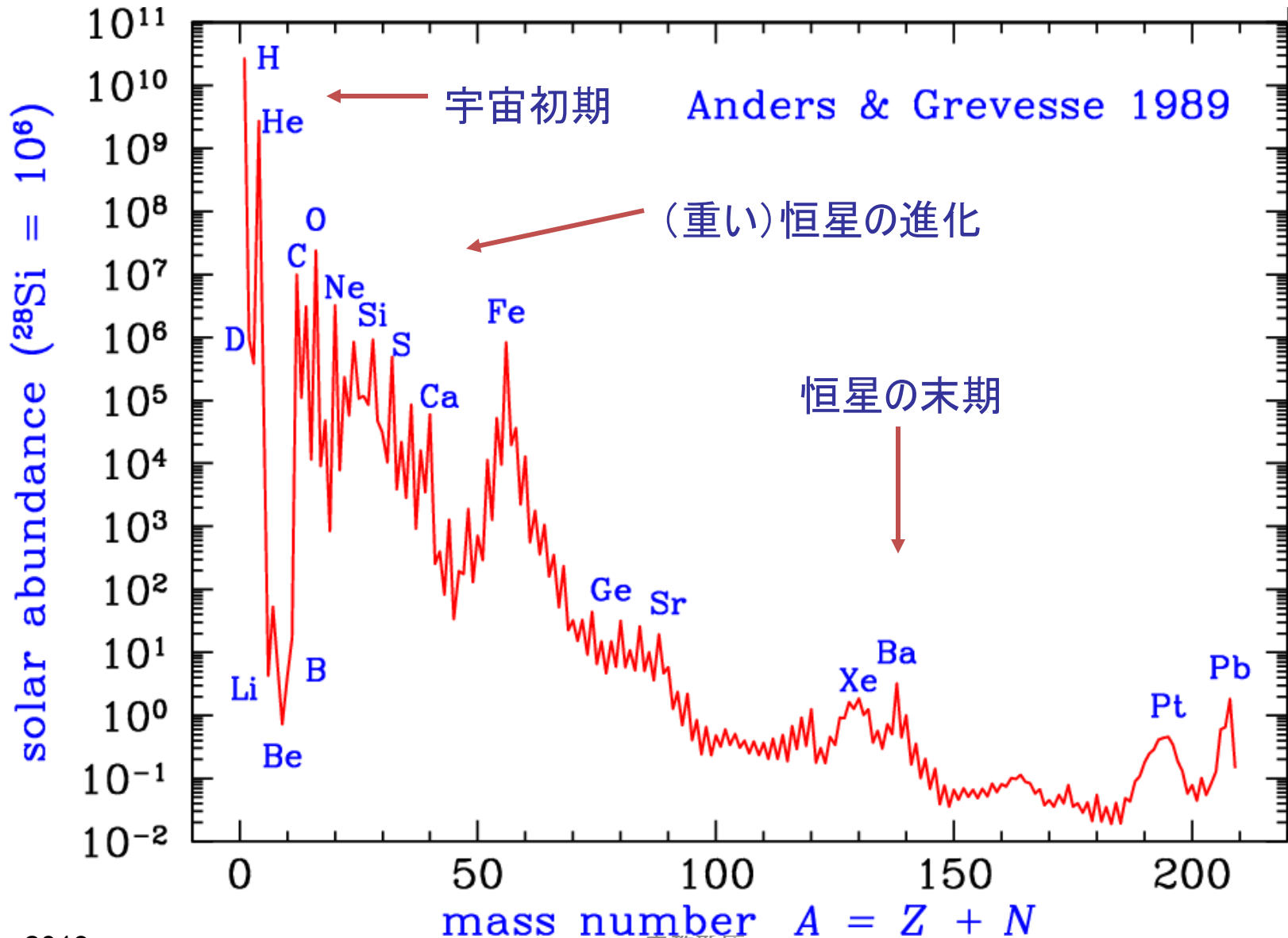
温度(対数)



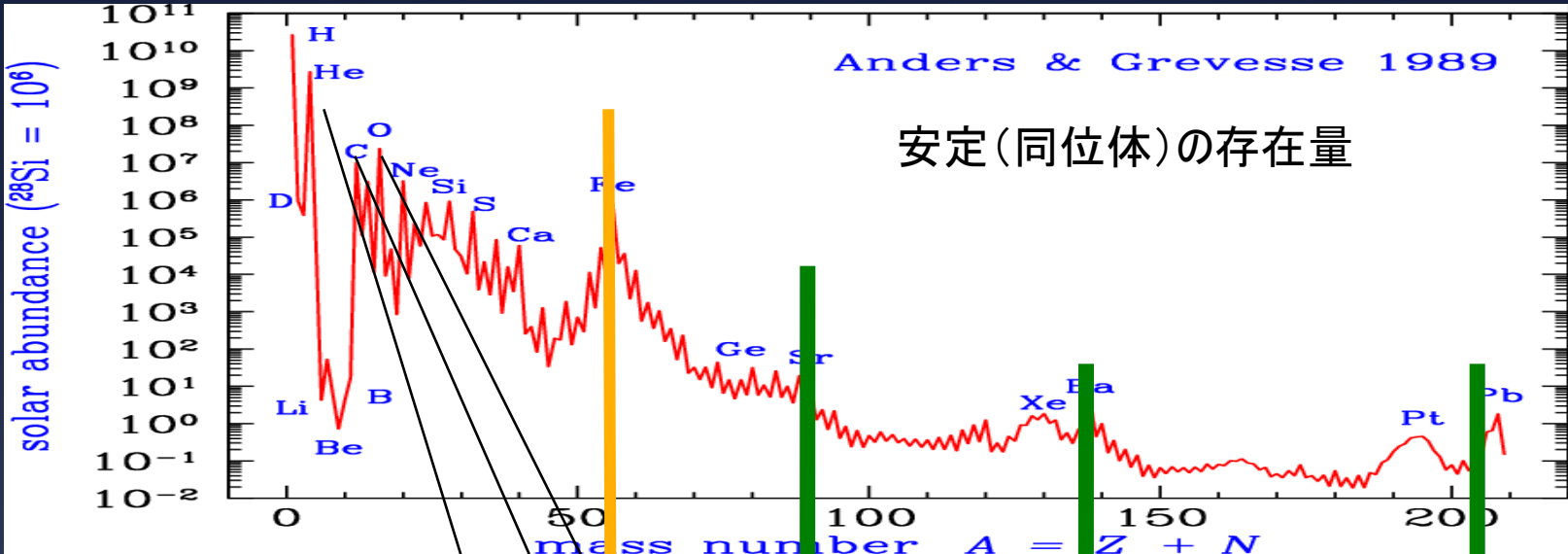
← ビッグバン

時間(対数)

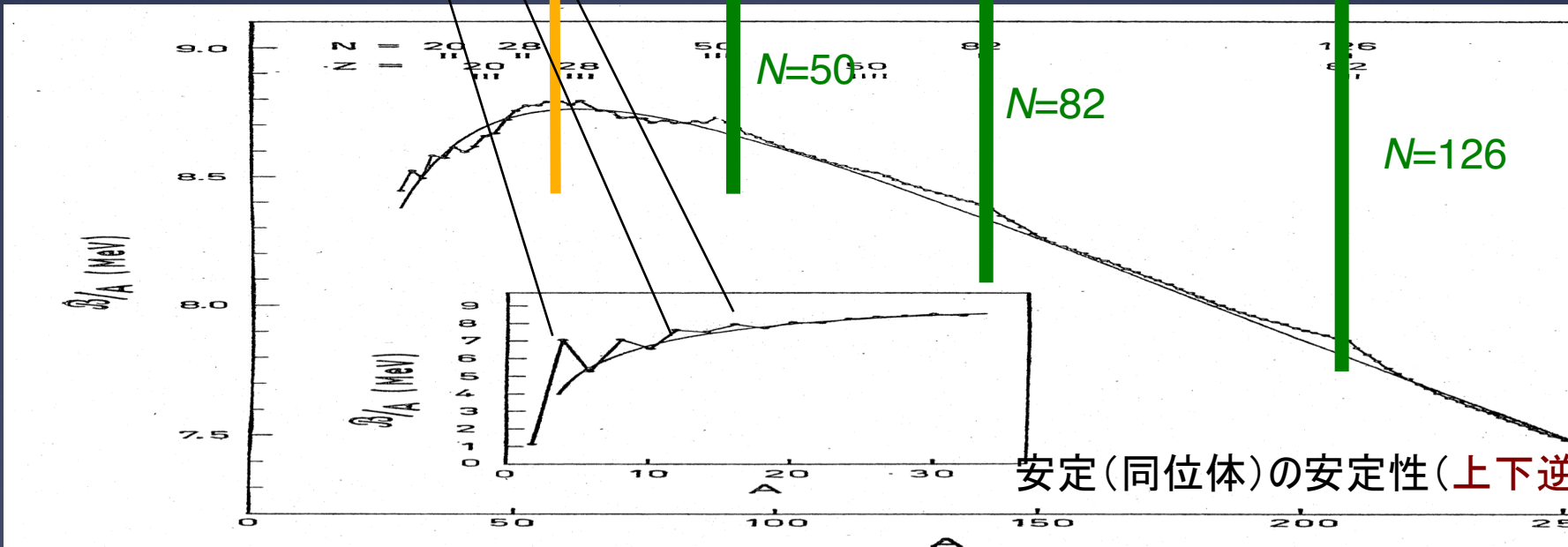
太陽系 (~宇宙) の元素組成 (存在比)



元素(同位体)の存在量と原子核の安定性は関係している - ヒント(核が反応....)



nuclear binding energy per nucleon (B/A)



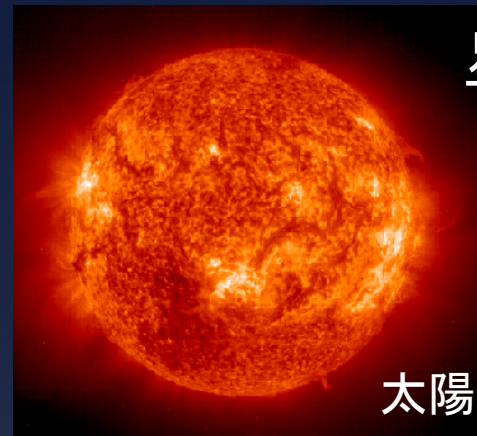
6つのポイント（1学期おさらい）

1. 元素と原子核 陽子の数が元素を決める
2. 宇宙の歴史 ビックバンから約140億年続く膨張
3. 星の進化 原子核が燃えて重いと超新星爆発
4. 原子核の反応 断面積とは
5. 気体と温度 粒子の平均エネルギーは kT
6. 宇宙での元素の合成 ビックバン直後と星の中心
超新星、中性子合体.....

* 順不同

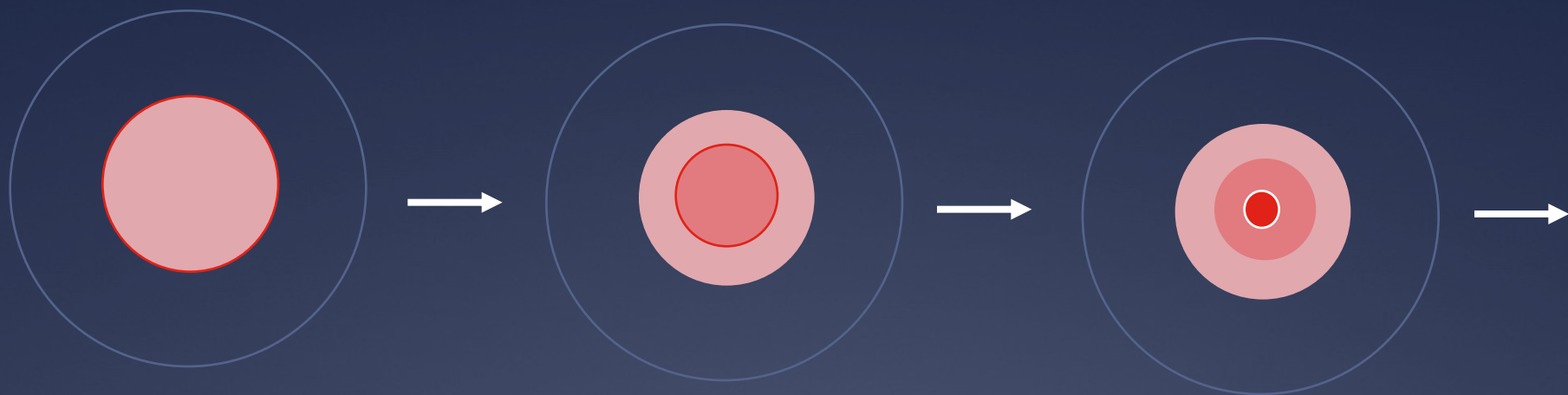
星は荷電粒子(原子核)の発熱反応によって光る
同時に元素が合成される

重力による断熱圧縮により高温ガス中の核反応が点火



太陽

主系列星の進化



水素が「燃え」る

太陽

$kT \sim 1 \text{ keV}$



ヘリウムが「燃え」る

(ここまで)

光の放射と重力がつりあう



炭素が「燃え」る

鉄まで.....



星が燃える - 原子核の反応

気体の温度 *c.f.* Maxwell Boltzmann 分布

高温: 分子(粒子)が速い

低温: 分子(粒子)が遅い

宇宙の原子、原子核

高速(高温)の衝突 => こわれる

低速(低温)の衝突 => 何も起きない

程々の衝突 => 融合が起きる

ビッグバン後

膨張する / 温度がどんどん下がる

原子核ができる(融合) 100 秒くらい

=> 原子 => 分子 => ... => 星

ビッグバンに始まる宇宙

最初は**火の玉** - 高温・高密度

膨張する宇宙 - **断熱冷却**
- **霧の発生** -

原子核(すなわち元素)はいつどこで作られたか
宇宙誕生100 秒後の宇宙
水素、ヘリウム、リチウム
輝く星の中心(10 億年後から)
鉄より軽い元素
星の末期、星の爆発
鉄より重い元素

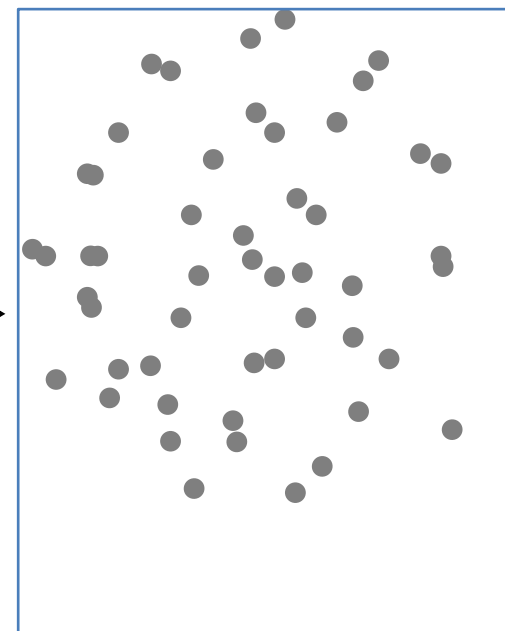
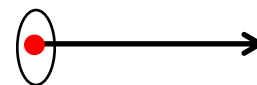
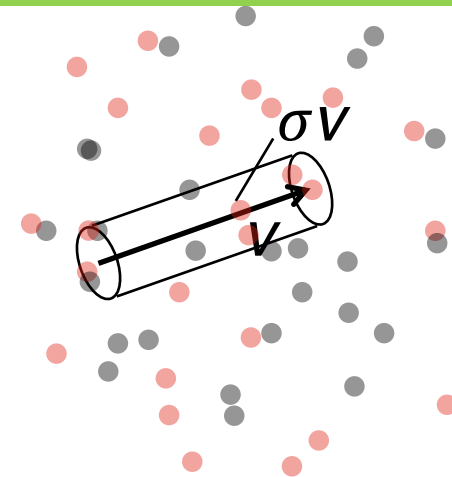
「宇宙は大きな鍋 - 元素を煮ている」

6つのポイント*

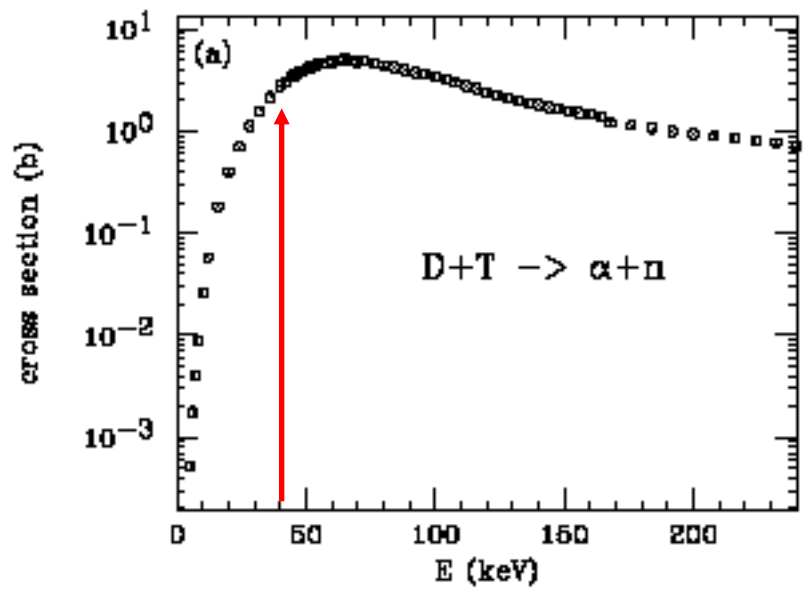
1. 元素と原子核 陽子の数が元素を決める
2. 宇宙の歴史 ビックバンから約140億年続く膨張
3. 星の進化 原子核が燃えて重いと超新星爆発
4. 原子核の反応 断面積とは
5. 気体と温度 粒子の平均エネルギーは kT
6. 宇宙での元素の合成 ビックバン直後と星の中心
超新星、中性子合体.....

* 順不同

1. いろいろな状況
星の中のようなガス（星ってガスなのである）
「ビーム」を「標的」にぶつける場合
例）ラザフォードの実験
ビーム衝突実験
例）ヒッグス粒子の発見
2. 断面積は状況にはよらない
重心系と実験室系
3. 断面積はエネルギーとともに変化する（次ページに例）
← クーロン反発力とトンネル効果

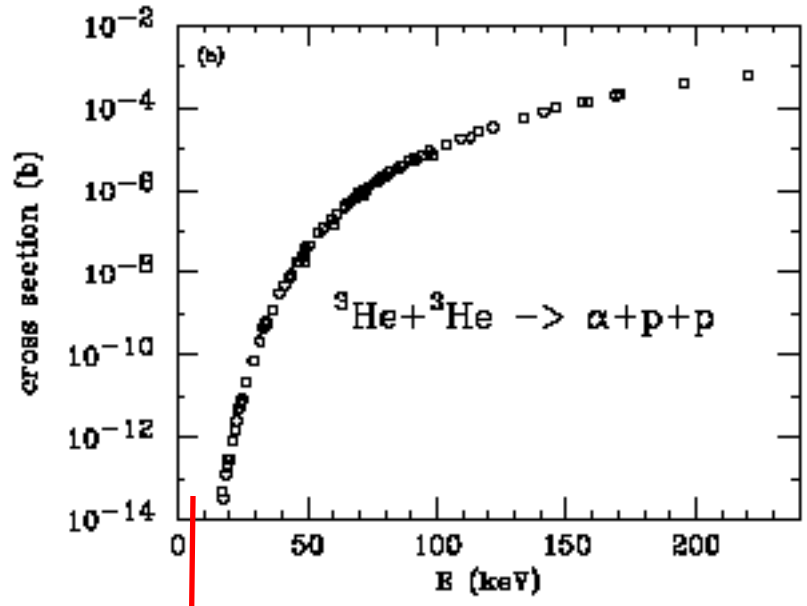


核融合炉が想定する
反応では、
断面積は「そこそこ」



日本の核融合炉
JT60
5億度
 $kT=41$ keV

星の温度では、
断面積は小さい



太陽中心
1500万度
 $kT=1.2$ keV

6つのポイント（1学期おさらい）

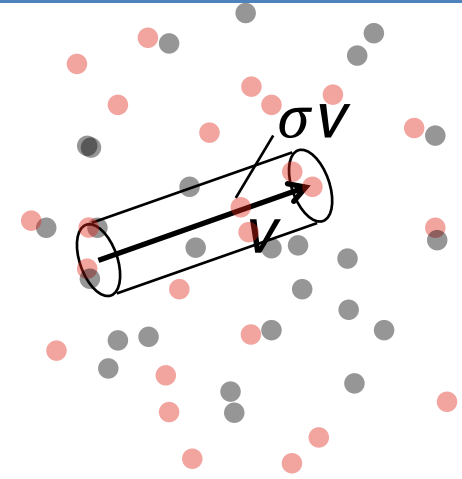
1. 元素と原子核 陽子の数が元素を決める
2. 宇宙の歴史 ビックバンから約140億年続く膨張
3. 星の進化 原子核が燃えて重いと超新星爆発
4. 原子核の反応 断面積とは
5. 気体と温度 粒子の平均エネルギーは kT
6. 宇宙での元素の合成 ビックバン直後と星の中心
超新星、中性子合体.....

* 順不同

核反応率

単位時間、単位体積あたりの核融合反応の数
= 密度 × 密度 × 核反応率

$$P_{12} = \rho_1 \rho_2 \langle \sigma v \rangle$$



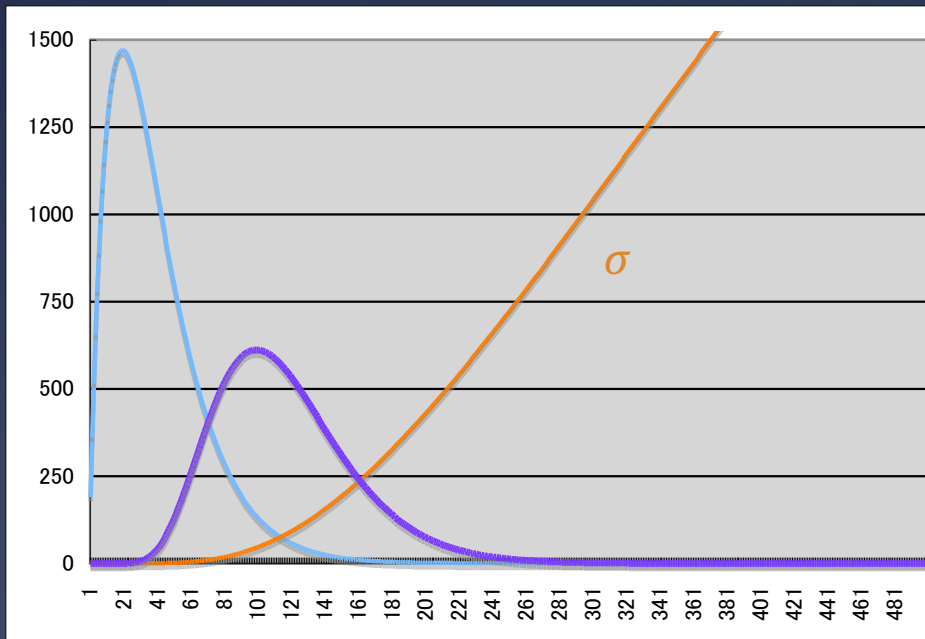
核反応率: 断面積 × 速度の平均 (<= 温度)

$$\langle \sigma v \rangle = \left(\frac{8}{\pi \mu_{12} (kT)^3} \right)^{1/2} \int dE \sigma(E) E \exp \left[-\frac{E}{kT} \right]$$

原子核の性質

反応が主に起きるエネルギーは kT より高い

ガモフのピーク



light blue: Maxwell-Boltzmann 分布
orange: 断面積
purple: 両者の積 (積分される関数)



ガモフさん (1904-1968)

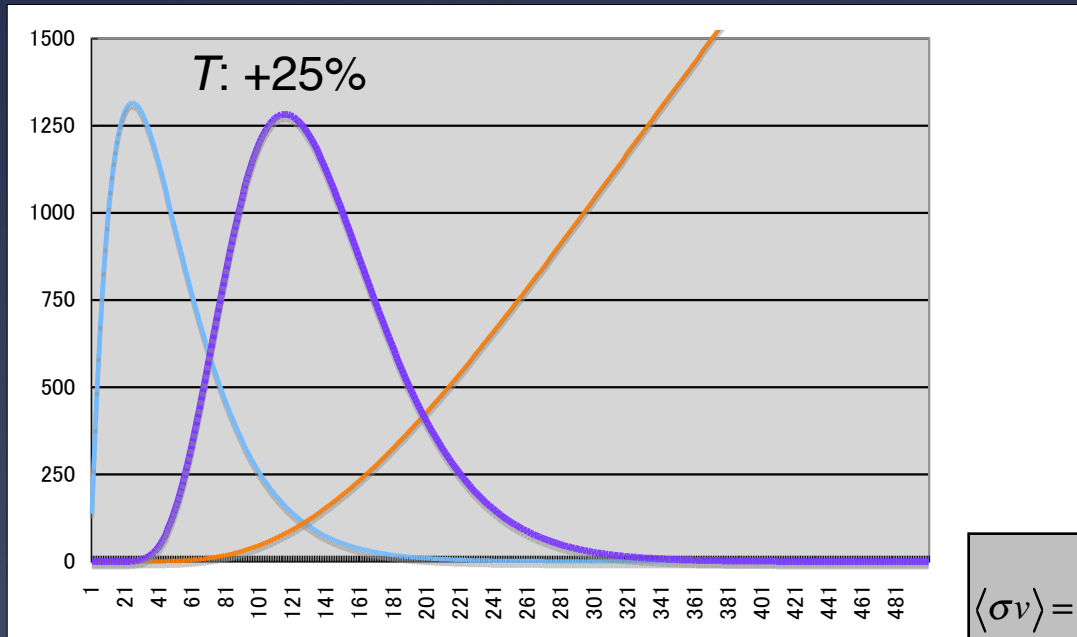
$$\langle \sigma v \rangle = \left(\frac{8}{\pi \mu_{12} (kT)^3} \right)^{1/2} \int dE \sigma(E) E \exp \left[-\frac{E}{kT} \right]$$

反応が主に起きるエネルギーは kT より高い

ガモフのピーク



ガモフさん(1904-1968)



$$\langle \sigma v \rangle = \left(\frac{8}{\pi \mu_{12} (kT)^3} \right)^{1/2} \int dE \sigma(E) E \exp\left[-\frac{E}{kT} \right]$$

light blue: Maxwell-Boltzmann 分布

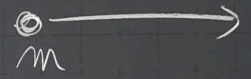
orange: 断面積

purple: 両者の積(積分される関数)

kT T (室溫)

25 meV 300 K

2.5×10^{-2} 3×10^2
eV H



$p = mv$

非相對論的表現

光子 — 運動量
光 — 壓力

$v \ll c$



6つのポイント*

1. 元素と原子核 陽子の数が元素を決める
2. 宇宙の歴史 ビックバンから約140億年続く膨張
3. 星の進化 原子核が燃えて重いと超新星爆発
4. 原子核の反応 断面積とは
5. 気体と温度 粒子の平均エネルギーは kT
6. 宇宙での元素の合成 ビックバン直後と星の中心
超新星、中性子合体.....

* 順不同