

19.4 のまとめ

膨張する宇宙

- 宇宙には 10^{23} 個の銀河があると信じられている。
- 銀河の速度 v の測定値は、地球からその銀河までの距離 d にほぼ比例している。

$$v = H_0 \cdot d$$

$$H_0 = 50 \sim 100 \text{ km s}^{-1} / \text{Mpc} \quad (1 \text{ Pc} = 3.1 \cdot 10^{13} \text{ km} = 3.3 \text{ 光年})$$

H_0 はハッブル定数と呼ばれている。観測結果より宇宙は等方的に膨張していると解釈できる。

- 宇宙背景放射：温度 2.7K のマイクロ波の放射が等方的に観測される。
- Friedman 模型：宇宙の最も簡単な模型。宇宙の平均質量密度により 3 パターンある。
 1. 臨界密度より大きいと、膨張が遅くなり 収縮に転じ、最後は一点に収縮し崩壊（閉じた宇宙）
 2. 臨界密度より小さいと、宇宙は膨張し続ける（開いた宇宙）
 3. 臨界密度とほぼ等しい場合 宇宙は漸近的にある半径に近づく。
- 暗黒物質があるのではないか？
候補の一つとしてニュートリノ

- 臨界密度以下の場合の宇宙の年齢

$$t_0 = \frac{1}{H_0} \quad (100 \text{ 億年から } 200 \text{ 億年の間})$$

宇宙の最初の 3 分間

- 初め
粒子、反粒子、ゲージボソンはすべて熱的平衡状態にあった。温度は大変高く、クォークとレプトンの違いはなく、すべての相互作用の強度は同じだった。
- 約 10^{-35} 後
膨張により温度が下がり、相転移が起こり強い相互作用と電弱相互作用が分離。
- 約 10^{-11} 後
温度は約 100GeV となり、次の相転移が起こって弱い相互作用と電磁相互作用が分離。
- 約 10^{-6} 後
さらに膨張して、温度は 100MeV まで下がる。クォークが束縛されて、バリオンや中間子ができた。

- 約 1 秒後
温度は 1MeV となった。ニュートリノのエネルギーが小さくなり物質から分離され、物質とはほとんど相互作用せずに宇宙を自由に動いている。
- 約 3 分後
温度は 100keV まで下がる。光子のエネルギーが下がり、核融合によって軽い原子核が作られ始めた。重陽子、ヘリウム、リチウム原子核の元素合成（ビッグバン元素合成）が起きた。

物質 - 反物質の非対称性

現在の宇宙は物質によってのみできており、反物質で出来ているものは見つかってない。現在バリオン数を光子の数で割った比は $3 \cdot 10^{-10}$ で、この光子は全てクォーク・反クォーク消滅によって出来たとするなら、初期宇宙の熱いプラズマにおいてクォーク・反クォークの非対称性が、

$$\Delta q = \frac{q - \bar{q}}{q + \bar{q}} = 3 \cdot 10^{-10}$$

だけあれば、現在観測される物質 - 反物質の非対称性を説明できる。

大統一理論では、物質 - 反物質の非対称性をつくるための 3 つの条件 CP の破れ、バリオン数非保存、熱的非平衡 が宇宙初期で満たされていたと想定する。

$t < 10^{-35} s$ の宇宙の状態

- X 粒子 (質量 10^{14}GeV) がバリオン数を破る反応を媒介。高エネルギーな状態では実粒子として存在できた。
- X ボソンはクォークと電子に崩壊。 \bar{X} ボソンは反クォークと陽電子に崩壊。
- X ボソンと \bar{X} ボソンの崩壊確率は同じでない (CP の破れ)。宇宙が熱いうちは、X ボソンと \bar{X} ボソンは熱平衡状態だったが、宇宙が冷めるとこれは破れ、ついで X ボソンの CP が破る崩壊によりクォークの過剰が起こった。

電弱相転移 宇宙誕生から 10^{-11} 秒ほどのこと

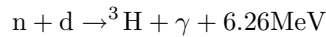
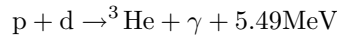
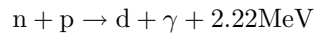
温度が $kT \approx 150 \text{GeV}$ になったとき電弱相転移が起こった。相転移の前は、光子、W、Z ボソンは同じ性質を持っていて、電磁気力と弱い力の違いは無かった（対称性があった）。しかし臨界温度以下になると自発的対称性の破れが起きた。この際 W と Z ボソンは Higgs 場によって質量を得た。（11 章）

ハドロンの生成 宇宙誕生から 10^{-9} 秒ほどのこと

- 温度が $kT \approx 100\text{MeV}$ くらいになるとクォーク - グルーオン・プラズマからハドロ
ンが生成
- 陽子と中性子は自由粒子として存在し、熱平衡状態にあった。
- 温度が下がって来ると、中性子の質量は陽子の質量よりも大きいので、陽子の方が数
が多くなった。

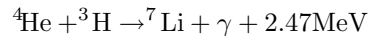
初期宇宙での元素合成 宇宙誕生から 200 秒ほどのこと

- バリオン物質は 88% が陽子で、12% が中性子だった。
- 重陽子の生成と分裂は平衡状態にあった。温度が下がると重陽子は分解できなくな
り、以下のような連鎖反応が起きるようになった。



その後 ${}^3\text{H} + p, {}^3\text{He} + n, {}^3\text{He} + d, d + d$ という反応によって最終的に安定な ${}^4\text{He}$ がで
きる。

- Li 原子核ができる反応は、



となり、



でただちに壊れる。初期宇宙ではほぼ全ての中性子は ${}^4\text{He}$ に組み込まれた。陽子の
大部分は単体として存在した。

19.5 章 星の進化と元素合成

- ${}^7\text{Li}$ より重い原子核は星の内部で核融合で生成された。星は星間ガスやちりが一ヶ所
に集中することによってできる。これらの物質はほぼ完全に、宇宙初期にできた水素
とヘリウムからなっている。核融合が可能なほど温度と圧力が大きくと放射が起き、
その圧力によって星が更に収縮することが妨げされる。
- 熱平衡の状態ではビリアル定理から、星の内部のガスの平均運動エネルギーと平均ポ
テンシャルエネルギーについて $2\bar{T} = -\bar{U}$ が成り立つ。原子の平均運動エネルギーは
(十分高温なら) ポテンシャルエネルギーのちょうど半分であるといえる。

核融合反応

- 平衡状態では星は、放射したエネルギーと同じだけのエネルギーを原子核反応によって生成する。したがって平衡状態は本質的には核融合反応の反応率に依存する。
- 特に有効なのが、水素から ${}^4\text{He}$ への核融合であり、これは ${}^4\text{He}$ の結合エネルギーが近傍の原子核と比べると特に大きいからである。
- 核融合反応が起きる前提条件は、始状態に存在する原子核間のクーロン障壁を越えること。それにはクーロン障壁の透過率 e^{-2G} の大きさが問題となる。ここで G は Gamow 因子 (3 章) で

$$G = \frac{\pi\alpha Z_1 Z_2}{v/c}$$

v : 相対速度

- 単位体積あたりの反応率は (4.3)(4.4) より

$$\dot{N} = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$$

温度 T の熱い星のプラズマにおいて相互作用している粒子の速度分布はマクスウェル-ボルツマン分布

$$n(v) \propto e^{-mv^2/2kT} = e^{-E/kT}$$

に従ってばらついているため $\langle \sigma v \rangle$ のように平均をとる必要がある。この平均値は、 v について積分することによって求められる。ここで、

$$\sigma \propto e^{-G}$$

より、

$$\begin{aligned} \sigma v dv &= e^{-2G} v e^{-E/kT} dv \\ &= e^{-b/E^{1/2}} e^{-E/kT} \frac{dE}{m} \end{aligned}$$

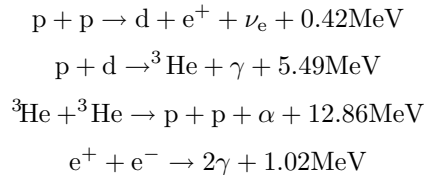
$$\text{ただし、 } b = \frac{\pi\alpha c\sqrt{m}}{\sqrt{2}} \cdot Z_1 Z_2$$

図 19.10 がマクスウェル分布と Gamow 因子のたたみ込みを図式的に表したものの。電荷数が大きいと点線部分のピークが右にシフトするので、核融合反応が起きて十分なエネルギーが発生するには、電荷数が大きければ大きい程、温度が高くなければならない。

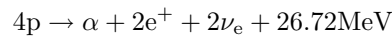
- 質量の大きな星は中心部における気圧、密度が高いので小さい星に比べて反応率が大きい。だから大きい星は短寿命である。

水素の燃焼

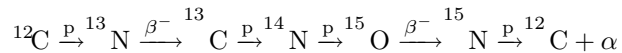
星の形成期に太陽の約10分の一より大きな質量が集まると、星の内部の温度が $T > 10^7 K$ となり最初の核融合が起きるようになる。初期の星では以下のような pp サイクルによりエネルギーを得る。



まとめて、



このうち 0.52MeV はニュートリノによって星から持ち去られる。このうち一番初めの反応は弱い相互作用が関わるので反応速度が遅い。ゆえに星はゆっくり燃焼する。大きな星でも ${}^{12}\text{C}$ がすでに存在するなら以下のような CNO サイクルが起こる。



炭素は触媒の役割を果たすだけで実質的な反応は pp サイクルと変わらない。

ヘリウムの燃焼

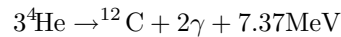
- 水素の供給が尽きると、ヘリウムからなる星の核は重力による圧力に抗することができずにつぶれる。太陽よりずっと小さい星は、縮退圧によって支えられる白色矮星になる。
- 質量が大きい星だと、ヘリウムの燃焼が始まり赤色巨星になる。星の内部の温度が $10^8 K$ になると、 ${}^8\text{Be}$ が合成され始め、



という反応が平衡状態になる。さらに、



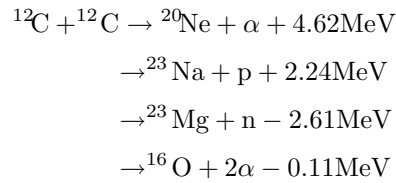
により、炭素ができる。ヘリウムから炭素への反応をまとめて



宇宙における重い原子核はすべてこの過程を経て作られている。

鉄までの燃焼

- ヘリウムの供給が終わるときに星は主として ^{12}C でできている。そして太陽くらいの星は白色矮星になり、より重たい星は新たな核融合が起こる。一例として

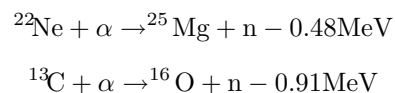


- 温度は、星の中央部で最も高く、表面に向かって減少する傾向があるので、核融合が実現する条件の違いから星の内部の "玉ねぎ構造" が形成される。星の中央部では鉄が合成されるのに対し、星の表面に近いほど軽い元素が生成される。鉄の原子核は核子あたりの結合エネルギーが最大なので、星における核融合の過程は鉄が合成されて終結する。
- 星の中央部が鉄になって新たなエネルギー源が無くなると、重力にさからうための放射圧力も熱運動も無くなるので星は崩壊し、超新星爆発を起こす。
- 爆発のあとに残った星の芯の質量によって白色矮星、中性子星、ブラックホールのどれかになる。

より重い原子核の合成

鉄より重い原子核は中性子を順次吸収することによって作られる。これには2つの過程がある。

s 過程 (slow process)



という反応によって出た中性子を他の原子核が吸収することによって中性子過剰な原子核の同位体ができる。それが β 崩壊していくことにより安定な同重体に達する。鉛より重い元素は作れない。

r 過程 (rapid process)

この過程は超新星爆発の最中に起こる。中性子のフラックスは $10^{32}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ にも達するので、原子核が β 崩壊や α 崩壊をするよりも速く中性子を次々に吸収する。これにより鉛より重い元素も生成される。

20章 強い相互作用する多体系

クォークからなる多体系には様々な性質がある。

準粒子

構成要素間の相互作用を取り扱うかわりに考える”実効的な粒子”。多体系は、十分低い励起エネルギーにおいては準粒子の系として記述できる場合が多い。

ex:半導体における空孔、BCSにおけるフォノン、構成子クォーク

集団的状态

低エネルギーの励起の状態の一つ。

ex:結晶の格子の振動、原子核の表面の振動、巨大双極子共鳴

カオスの現象

励起エネルギーが増すと、どのような多体系も複雑さが増し、基本的な励起に基づいて定量的に記述できなくなり、統計的に扱うことしかできなくなる。

ex:19-1,19-2 の例

ハドロン

グルーオンとクォークからなる系。これらを単体で観測するには無限に大きい運動量移行が必要であり、実際の実験で観測されるのは構成子クォークである。構成子クォークは複合物なので、素粒子ではなく準粒子とみなすべき。ハドロンの3GeV以上の高励起状態や集団的状态はまだ観測されていない。

強い相互作用の力

基本的粒子(クォークとレプトン)は光子やグルーオンなどのゲージ粒子の交換によって相互作用する。内部構造を持つ系に働く力は複雑で、核子や構成子クォーク間の力は第一近似で短距離力であり、スピンとアイソスピンの組み合わせにより引力であったり斥力であったりする。

斥力は、クォークの強いスピン - スピン相互作用によるものであり、引力の大部分は中間子交換模型で記述される(16章)。原子核の中では、これらの力が更にパウリ原理による斥力などの多体効果によって強く変更を受ける。

原子核

- 原子核の構成要素は核子のみではなく、準粒子からなっているとするのが現実的な見方である。この準粒子はフェルミ分布の縁に近いところでは、核子とよく似た性質を示す。原子核の低エネルギーの現象（スピン、磁気モーメント、励起エネルギー）は、最外殻の弱く束縛された核子もしくは空孔の性質によって理解できる。（殻模型）しかし深く束縛された核子については殻模型は使えない。
- 原子核の中にあるもっと大きな単位の準粒子として、中性子の対もしくは陽子の対がある。これらは原子核のなか $J^P = 0^+$ の系に結合する。（17章、対エネルギーの項）
- その他にも巨大双極子共鳴、形の振動、4重極励起、回転バンドなどは準粒子的性質、集団運動的性質を持っている。
- 更に高い励起エネルギーでは、原子核の状態密度が指数関数的に増えるので個々の状態を定量的に記述することは不可能になる。この領域では逆に統計的な方法が有効になる。

おわりに

- 複雑な現象を扱うには実行的な構成要素や実効的な力を導入する必要があった。
- こういった実効的な理論は実験の分解能に対応している。
- 今日の指針1：素粒子物理の標準模型が基本的なものなのか、単に実効的な理論に過ぎないのかを検証する。
- 今日の指針2：強い相互作用をする相互作用の複合系の規則性をよりよく理解する。