

長寿命の強い相互作用をする粒子が 宇宙初期元素合成に与える効果

日下部 元彦
(宇宙線研究所・理論)

共同研究者

梶野 敏貴(国立天文台)、吉田敬(東大理)、
Mathews Grant J. (University of Notre Dame)

協力

上村 正康(九大理)
Boyd Richard N. (Lawrence Livermore National Laboratory)

2009/5/21

Abstract

- 長寿命のstrongly interacting massive particles (SIMPs, X) がBig Bang元素合成(BBN)に与える影響を計算した。
- 軽元素の始原組成について計算結果を観測値と比較し X粒子の存在度に制限を与えた。
 - 寿命 ≥ 200 sのheavy colored particleの存在を棄却

内容

1. Introduction

- ✓核反応率の要点
- ✓BBNのLi問題
- ✓長寿命負電荷重粒子存在時のBBN
- ✓長寿命SIMPのrelic abundance

2. モデル

3. 結果

4. まとめ

Introduction

核反応(複合核反応)

➤ 複合核反応率:

核反応 $1+2 \rightarrow 3+4$ [$1(2,3)4$ と表現する]で

比較低エネルギーで粒子が入射し複合核($1+2$)の中でエネルギーが多くの核子で共有され、ある出口チャンネルに崩壊する

$$1+2 \rightarrow C \rightarrow 3+4+Q$$

$$\sigma = \sigma_{\text{tot}} \frac{1}{(2I_1+1)(2I_2+1)} \sum_{I_1, I_2, I_3, I_4} \left| \langle 3,4 | H_{II} | C \rangle \langle C | H_I | 1,2 \rangle \right|^2$$

✓核因子
✓クーロン透過因子(荷電粒子の場合)

→例えば、s-waveの入射チャンネルのクーロン透過ファクターは

$$P \propto e^{-2\pi\eta} = \exp\left(-\frac{\sqrt{2\mu\pi}Z_1Z_2e^2}{\hbar E^{1/2}}\right)$$

$$\sigma(E) = \frac{1}{E} e^{-2\pi\eta} S(E)$$

➤ 逆反応 (1+2←3+4) 率:

核反応の時間反転不変性 → 順反応と逆反応の行列要素が等しい

$$\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{34}} = \frac{m_3 m_4 E_{34} (2I_3 + 1)(2I_4 + 1)(1 + \delta_{12})}{m_1 m_2 E_{12} (2I_1 + 1)(2I_2 + 1)(1 + \delta_{34})}$$

detailed balance

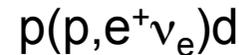
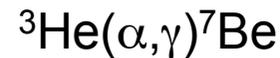
→ ボルツマン分布の熱平均をとると、4粒子(1,2,3,4)が関連する熱核反応率について

$$\frac{\langle \sigma v \rangle_{34}}{\langle \sigma v \rangle_{12}} = \frac{(2I_3 + 1)(2I_4 + 1)(1 + \delta_{12})}{(2I_1 + 1)(2I_2 + 1)(1 + \delta_{34})} \left(\frac{m_{12}}{m_{34}} \right)^{3/2} e^{-Q/k_B T}$$

← Q-value

➤ 核反応の強さ:

- ✓ 純粋な核反応は強い
- ✓ γ が絡む(電磁相互作用)と弱くなる
- ✓ 弱い相互作用が絡むと極弱い



$\sigma(2\text{MeV})=0.5 \text{ b}$

$\sigma(2\text{MeV})=10^{-6} \text{ b}$

$\sigma(2\text{MeV})=10^{-20} \text{ b}$

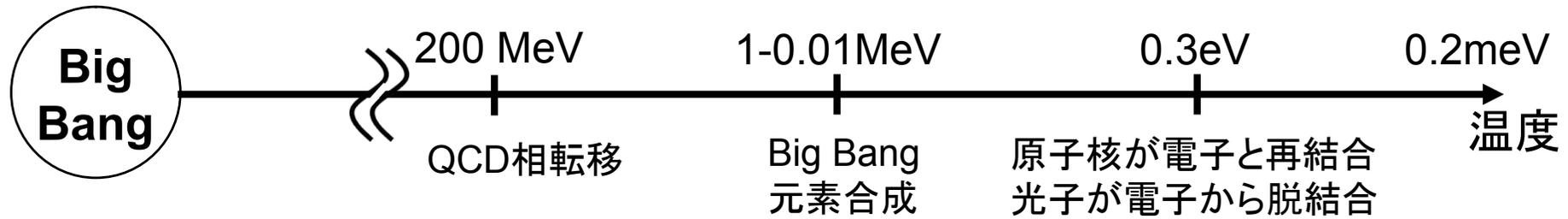
$1\text{b}=10^{-24} \text{ cm}^2$

初期宇宙の痕跡

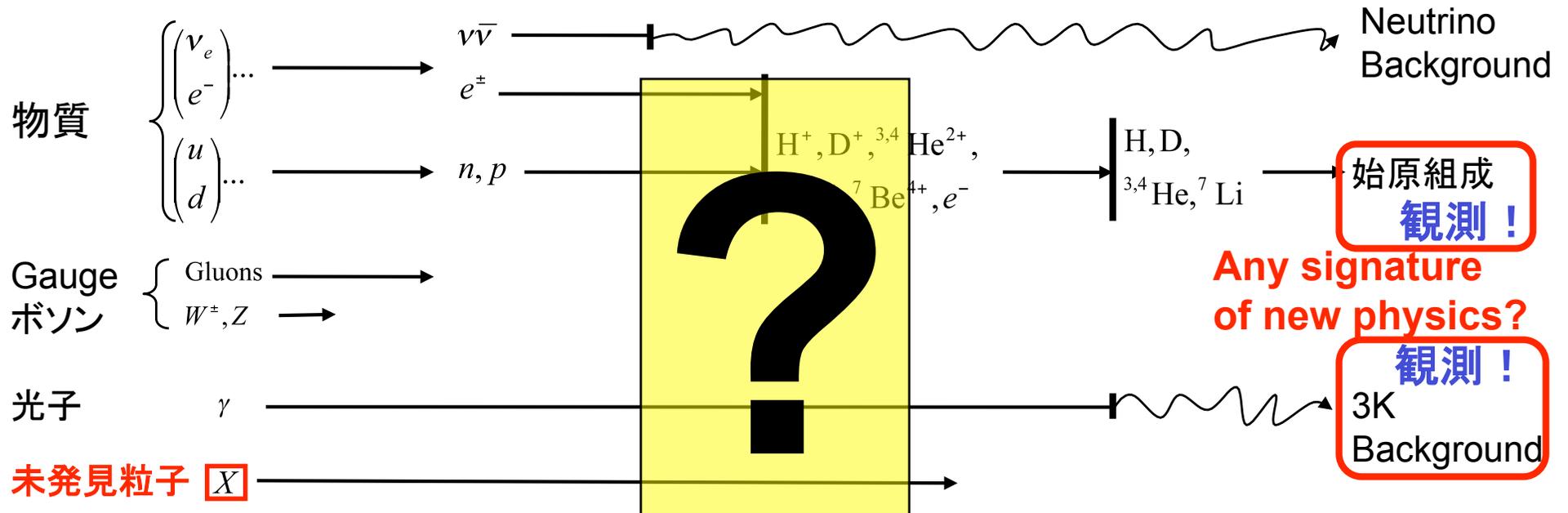
- Big Bang 理論では宇宙初期は高温
→ 高エネルギー時代の痕跡を軽元素組成で探る

$$\hbar=c=k_B \equiv 1$$

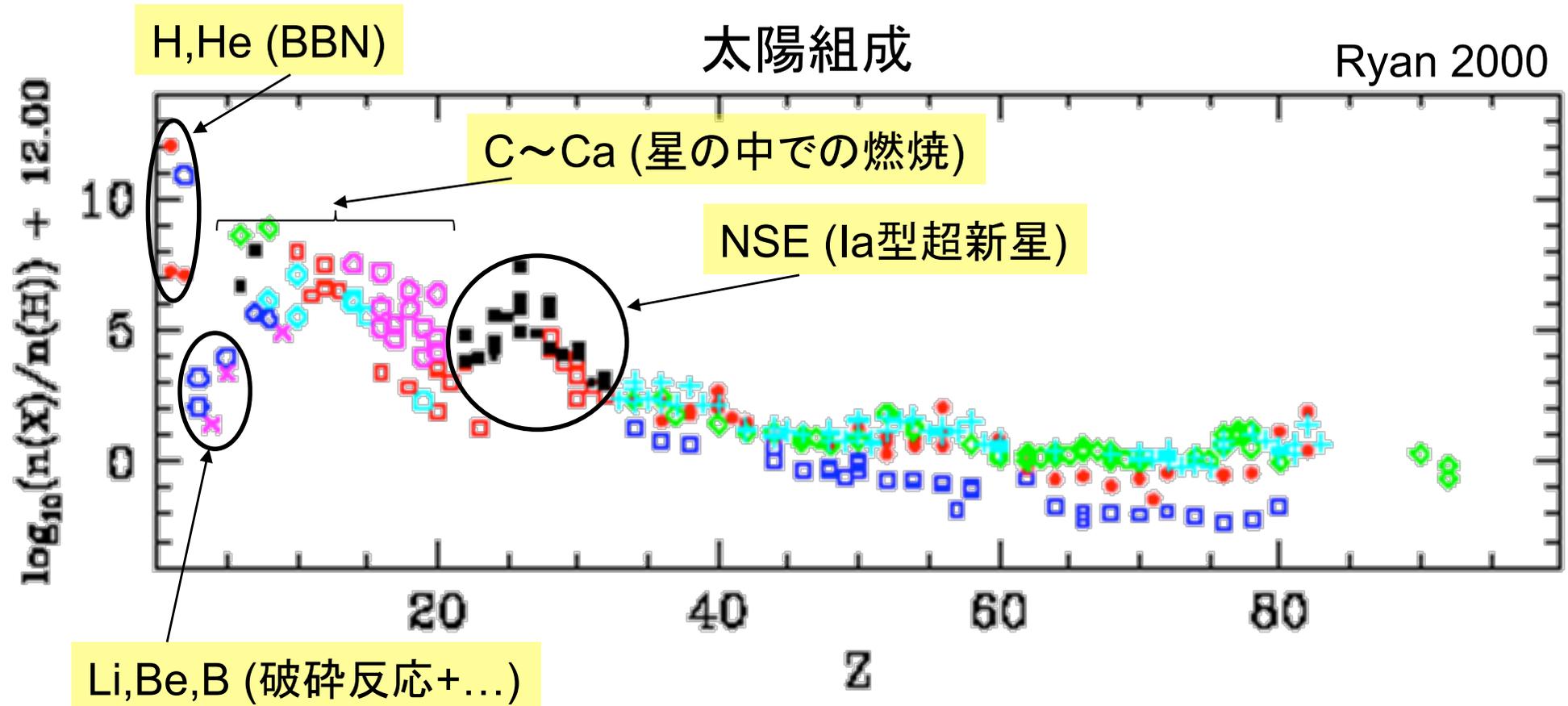
$$1\text{MeV}=1.1605 \times 10^{10} \text{ K}$$



[構成成分]



始原組成の観測



[起源]

D, ^3He , ^4He : BBN

^6Li : 銀河系宇宙線元素合成(CRN)

^7Li : BBN+CRN+超新星 ν 過程

^9Be , ^{10}B : CRN

^{11}B : CRN+超新星 ν 過程

➤ 始原組成の情報は古い天体にある

D : QSOの方向にある吸収系

^3He : 銀河系のHII領域

^4He : metal-poor outer galaxiesのHII領域

$^6,7\text{Li}$: Metal-Poor Halo Stars

始原組成の理論値

標準Big Bang元素合成 (SBBN)

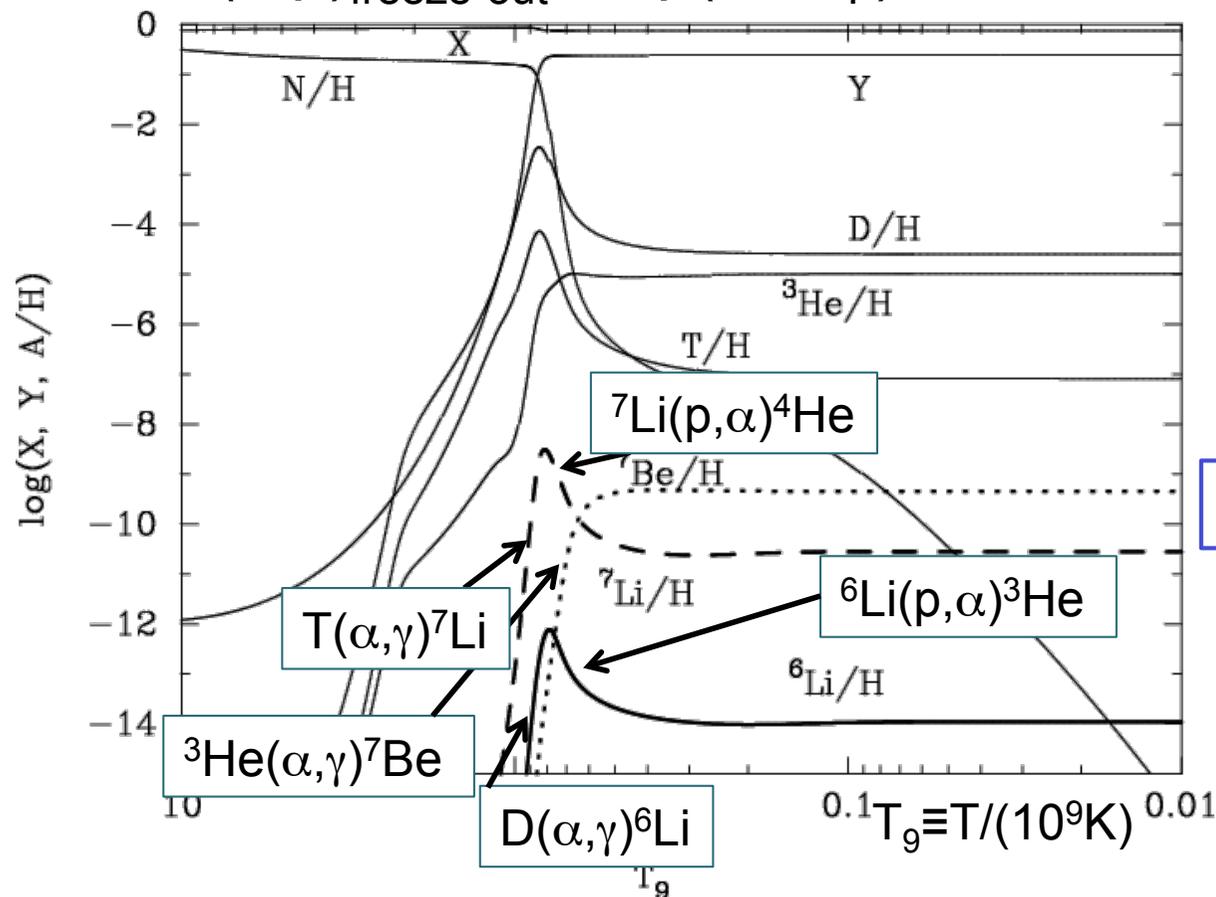
① $n \leftrightarrow p$ が平衡状態で、 $(n/p)_{EQ} = \exp(-Q/T)$ $Q \equiv m_n - m_p = 1.293 \text{ MeV}$

② $t \sim 1 \text{ sec}$, $T = T_F \sim 1 \text{ MeV}$ (弱い相互作用がfreeze-out) ($1 \text{ MeV} = 1.16 \times 10^{10} \text{ K}$)

✓ ニュートリノがphotonとdecouple ($\nu\bar{\nu} \leftrightarrow e^+e^- \leftrightarrow \gamma\gamma$)

✓ $n \leftrightarrow p$ の弱い反応がfreeze-out

$$(n/p)_{\text{freeze-out}} = \exp(-Q/T_F) \sim 1/6$$



Kawano code (1992)

Rates... Smith et al. (1993)
+ Descouvemont et al. (2004)
+ Cyburt & Davids
(arXiv:0809.3240)

$\tau_n = 881.9 \text{ s}$

(Mathews et al. 2005, average)

再結合、 e^- 捕獲で ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li}$

$\eta = n_b/n_\gamma = 6.3 \times 10^{-10}$

← WMAP

SBBN予言値と観測値の比較

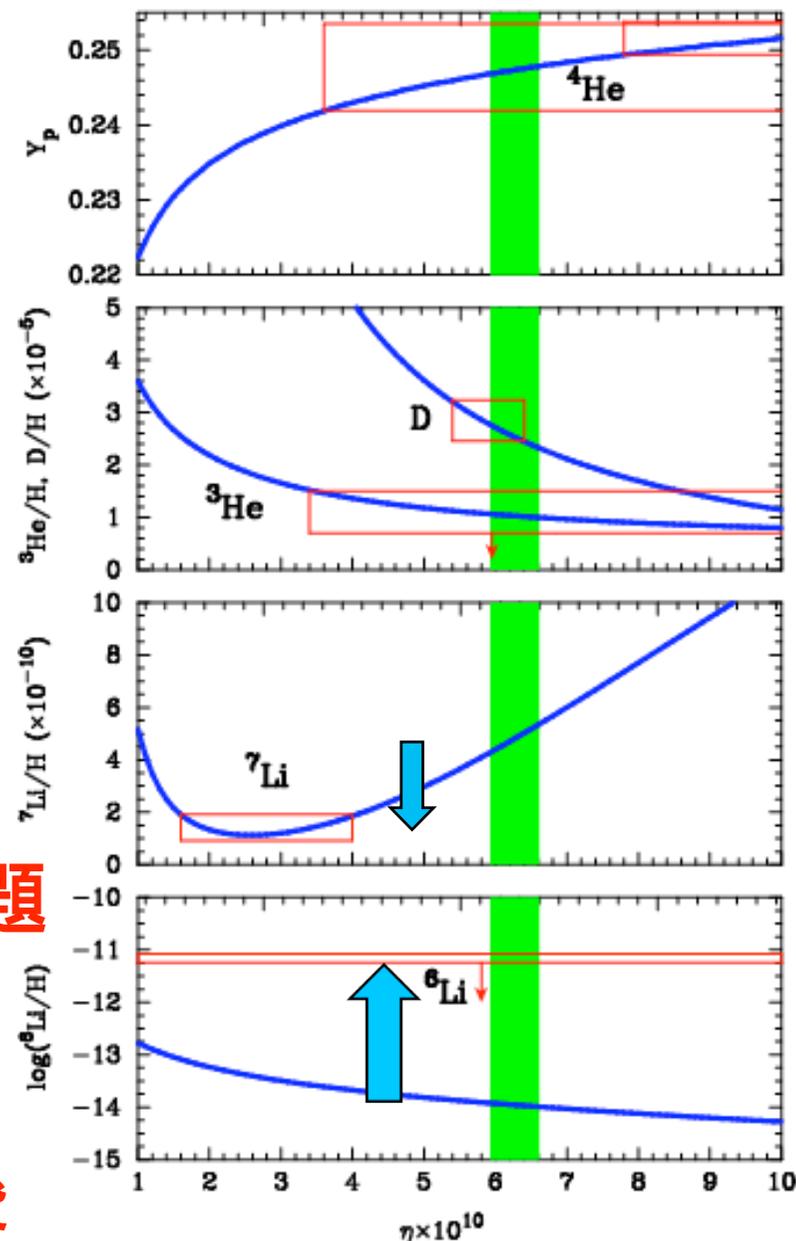
- SBBN: パラメータは
baryon-to-photon ratio η
 $\downarrow \eta = (6.27 \pm 0.17) \times 10^{-10}$
(WMAP: Dunkley et al. 2008)

- Metal-Poor Halo Star (MPHS)の ${}^7\text{Li}$ の観測値が
CMB+SBBNの予言値よりも
factor~3-4程度小さい

- ${}^6\text{Li}$ が高いレベルでプラトー
(+上限)組成を持つ

Li 問題

新しい物理過程を示唆



天体物理的過程

[⁶Li合成]

➤初期の宇宙線 α と背景 α の $\alpha+\alpha$
(Montmerle 1977)

✓銀河形成前の
超新星宇宙線

(Rollinde et al. 2005)

✓銀河形成中の構造形成
ショック宇宙線
(Suzuki & Inoue 2002)

➤超新星ejecta α +星周 α の $\alpha+\alpha$
(Nakamura et al. 2006)

➤MPHSフレア³Heの⁴He(³He,p)
(Tatischeff & Thibaud 2007)

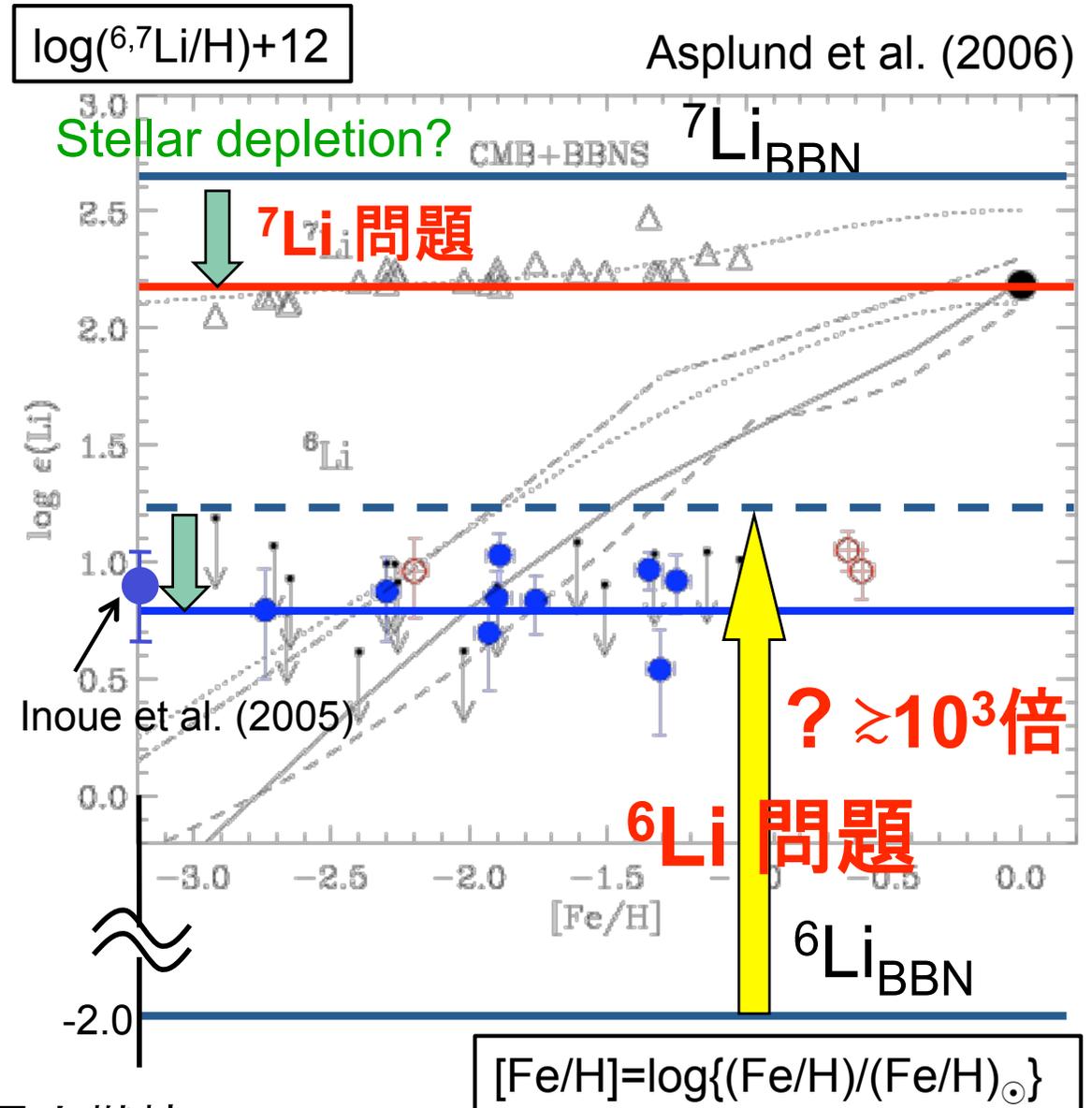
[^{6,7}Li減少]

➤銀河初期の超高効率化学進化(星内燃焼→ejection)

(Piau et al. 2006)

➤MPHS表面での原子拡散・乱流混合

(Richard et al. 2005)



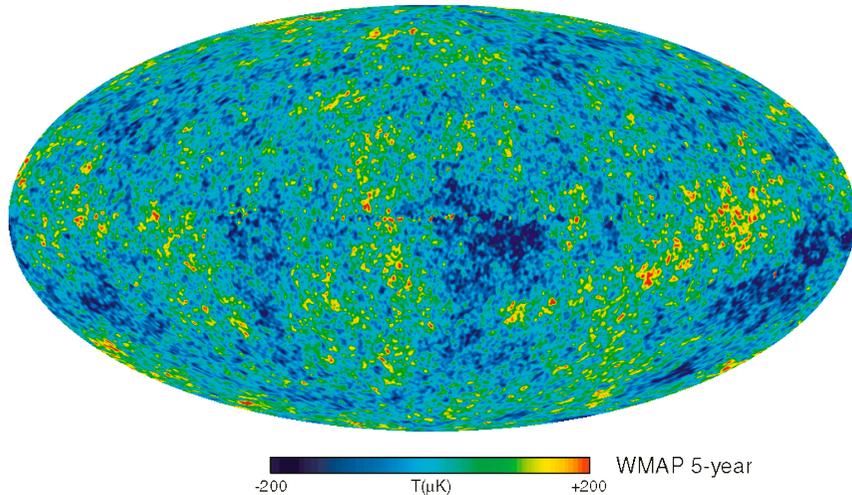
宇宙論的過程

➤ exoticな粒子の崩壊が引き起こす非熱的核反応

(Ellis et al. 1985-, Reno & Seckel 1988, Dimopoulos et al. 1988-, Kawasaki et al. 1988-, ...)

➤ 負電荷exotic粒子と原子核との束縛状態形成に伴うexoticな核反応

(Pospelov 2007, Kohri & Takayama 2007, Kawasaki et al. 2007-, Hamaguchi et al. 2007, ...)



-200 T(μK) +200 WMAP 5-year

The WMAP Science Team

➤ 標準宇宙論はうまく観測を説明するが

✓ 暗黒物質

✓ 暗黒エネルギー(加速膨張)

を含む

→ 暗黒物質を含む標準模型を超える理論が必要

(e.g. 超対称性・余剰次元)

→ 未発見粒子が存在

例)

✓ slepton(NLSP)

(Feng et al. 2003)

✓ gluino(split SUSY)

(Arkani-Hamed et al. 2005)

➤ 未発見粒子

① 高エネルギー加速器での合成

② 初期宇宙での効果

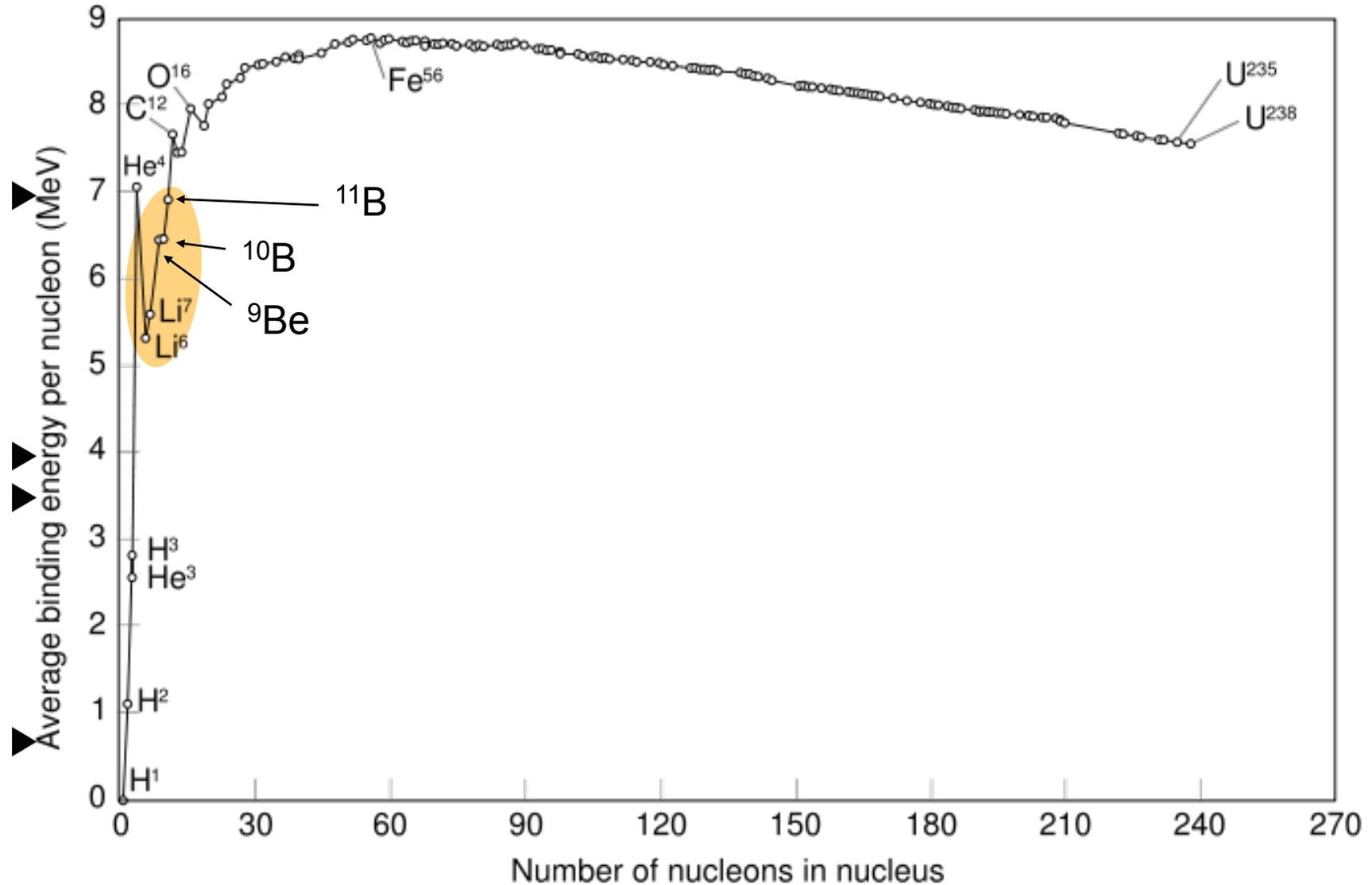
長寿命 → 軽元素への影響

SBBNの
6,7Li問題

Li, Be, Bは束縛が弱い

- 1核子(nとp)あたりの束縛エネルギー

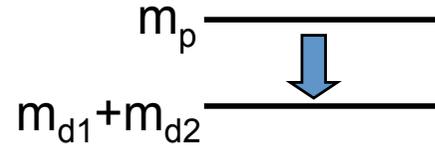
(Wikipedia)



元素合成のエネルギー源

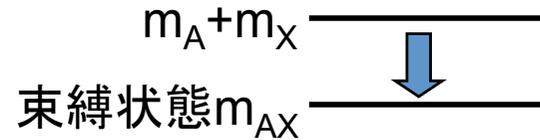
- ▶ 長寿命粒子の崩壊

粒子質量



- ▶ 相互作用する粒子の存在

束縛状態の
束縛エネルギー



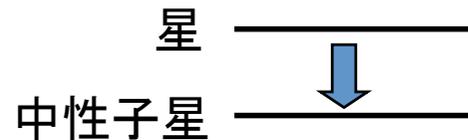
- ▶ 星での燃焼

星の重力束縛エネルギー



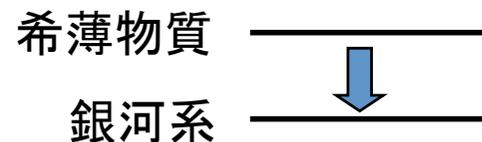
- ▶ 超新星宇宙線

高密度星の重力
束縛エネルギー



- ▶ 構造形成shock宇宙線

銀河系の重力
束縛エネルギー

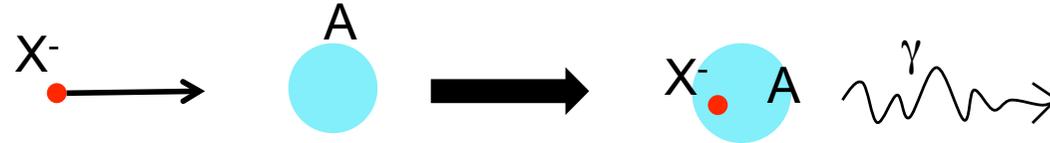


負電荷重粒子X⁻存在時のBBN

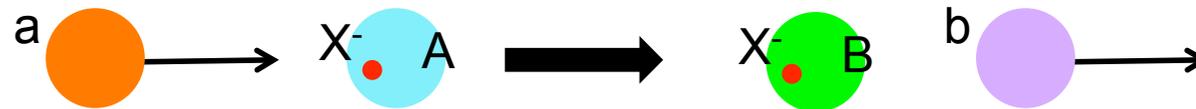
➤ 負電荷粒子X⁻が原子核Aに結合しA_X(X核)を形成 (Cahn & Glashow 1981)

➤ X⁻存在時に起こる過程

✓ 原子核とX⁻の再結合 (e.g. Kohri & Takayama 2007, Bird et al. 2008)



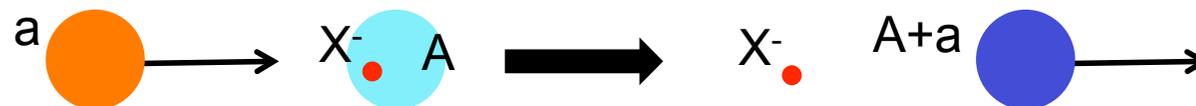
✓ X核が別のX核になる核反応 (e.g. Kohri & Takayama 2007)



✓ 原子核のX⁻捕獲 (電子捕獲様の弱い反応) (Jittoh et al. 2007, Bird et al. 2008)

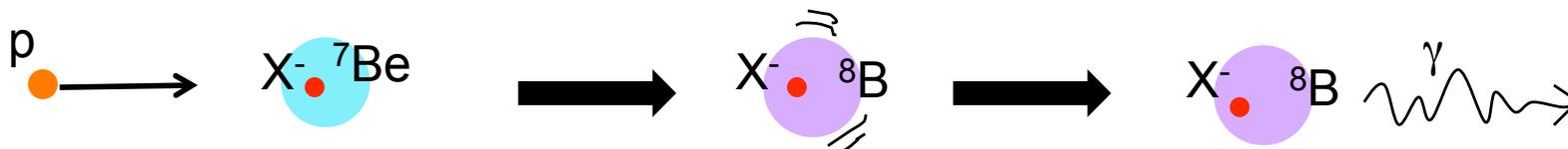


✓ X⁻が触媒する移行反応 (Pospelov 2007, Cyburt et al. 2006)



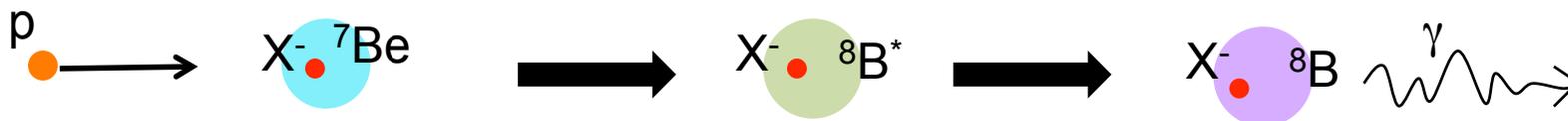
✓X核の原子励起状態を通る共鳴反応

(Bird et al. 2008)



✓核励起状態のX核を通る共鳴反応

(Kusakabe et al. 2007, Pospelov 2007)



${}^8\text{B}$ の 1^+ 核励起状態のX核経由の ${}^7\text{Be}_x(p,\gamma){}^8\text{B}_x$ 共鳴反応

Phys. Rev. D76 (2007)

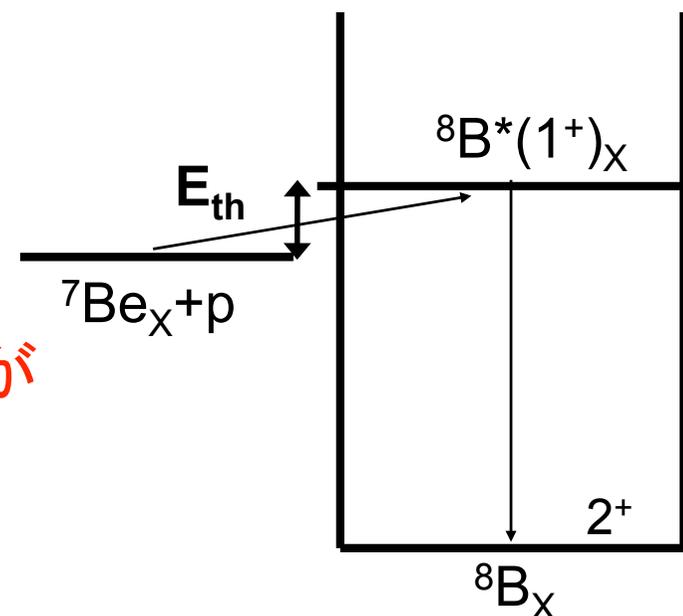
➤共鳴反応率の導出

✓ ${}^7\text{Be}+p\rightarrow{}^8\text{B}^*(1^+)\rightarrow{}^8\text{B}+\gamma$ の崩壊幅を利用

✓電荷、換算質量、エネルギーを補正

→ $E_{\text{th}}\sim 30\text{keV}$ ならばこの反応チャンネルが
 ${}^7\text{Be}_x$ の破壊に寄与→ ${}^7\text{Li}$ 減少

→束縛エネルギーの見積が重要



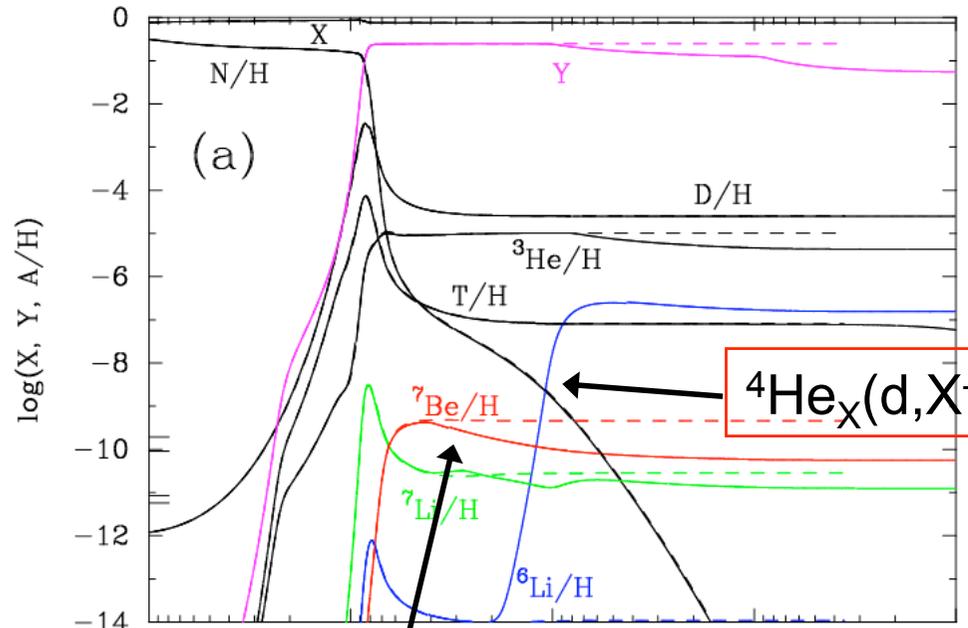
Abundance

現実的な反応率でのnetwork計算

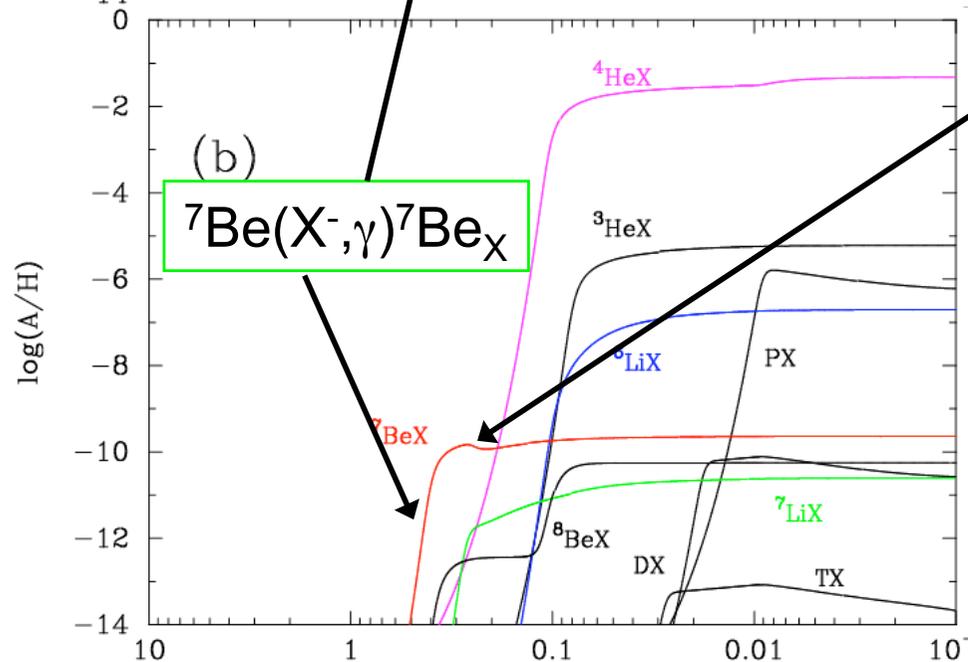
弱い反応 ${}^7\text{Be}_X \rightarrow {}^7\text{Li} + X^0$ なしの場合

Nuclear flow (case 1)

◆ $m_X \gg 1\text{GeV}$, $n_X = 0.05n_b$, $\tau_X = \infty$
 $\eta = 6.1 \times 10^{-10}$



${}^4\text{He}_X(d, X^-){}^6\text{Li}$ (Pospelov 2007)



${}^7\text{Be}_X + p \rightarrow {}^8\text{B}_X^{*a} \rightarrow {}^8\text{B}_X + \gamma$ (Bird et al. 2008)

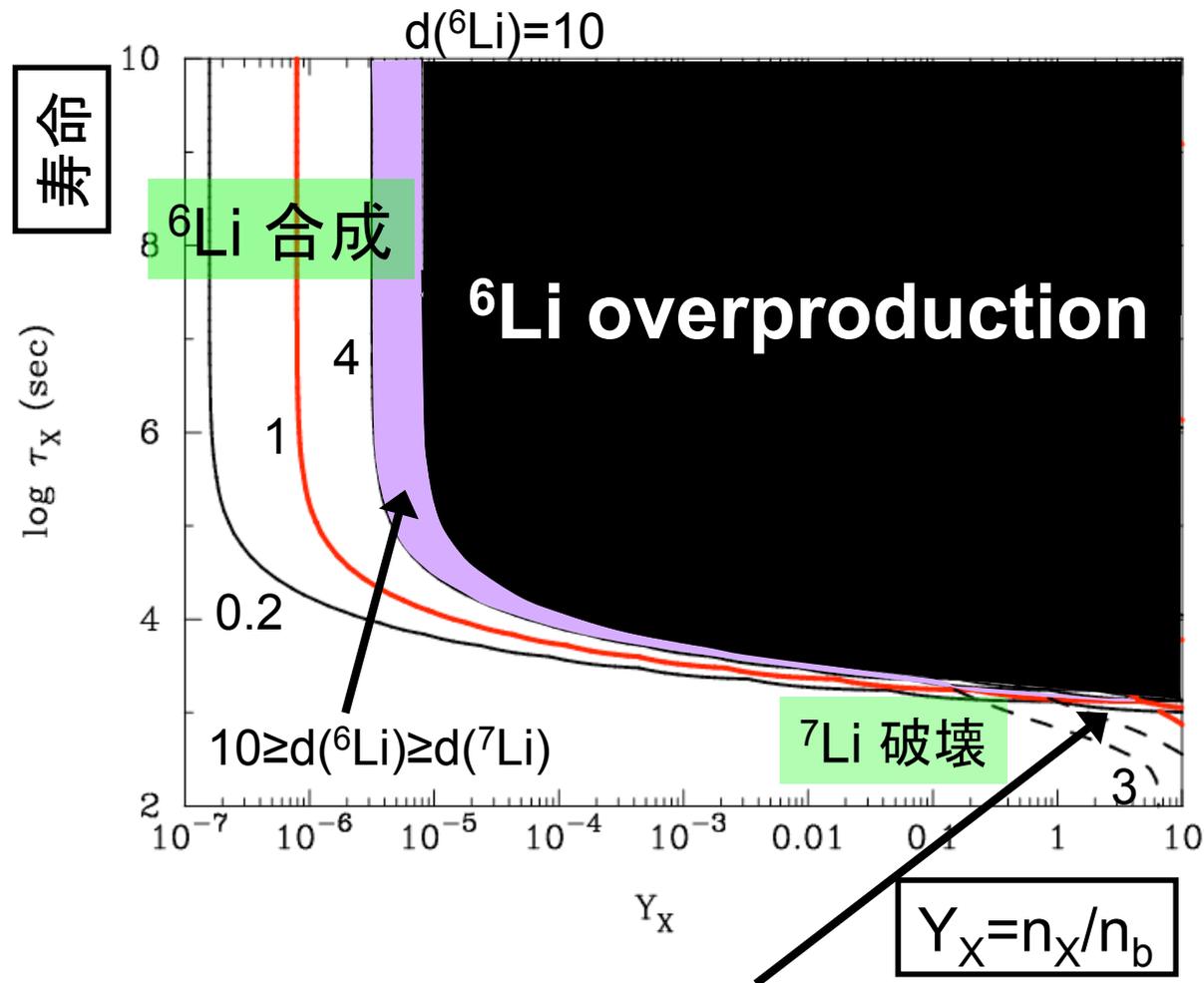
- X-の再結合が比較的低温で起こる
→ X核の核反応が効率的に起きない
- 質量数9以上の核は多く合成されない

温度 $T_9 = T / (10^9 \text{ K})$

現実的な反応率でのnetwork計算

計算されたLi組成を観測値で規格化した値の等高線: $d(^A\text{Li}) = A\text{Li}^{\text{Calc}}/A\text{Li}^{\text{Obs}}$

$$\eta = 6.1 \times 10^{-10}$$



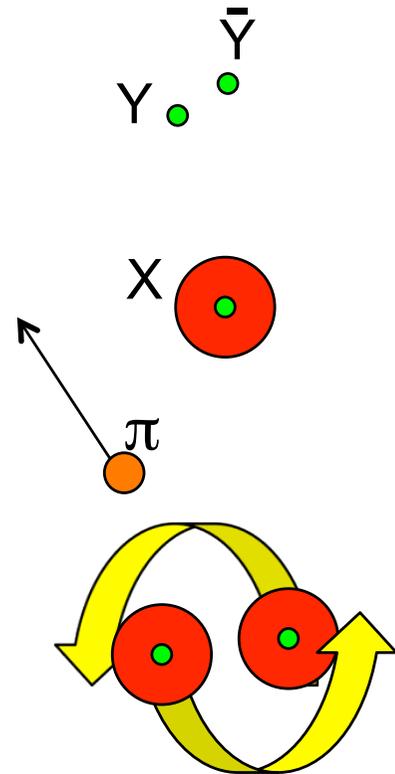
7Li破壊と6Li合成を同時に実現する領域:

$$Y_X \gtrsim 0.04-5 \text{ and } \tau_X \approx (1-3) \times 10^3 \text{ s}$$

強い相互作用をする粒子 X^0 存在時のBBN

重い長寿命Colored Particles Yのrelic abundance

Kang et al. (2008)



✓ 対消滅によりYは減る→最終組成 $n_Y/s \sim 10^{-14}$ ($n_Y/n_b \sim 10^{-4}$)

✓ $T < T_c \sim 180 \text{ MeV}$ で重いパートンが強粒子に閉じ込められる

✓ 強粒子の束縛状態形成→低エネルギー準位へ崩壊
→対消滅でまた減る

$$\frac{n_X}{n_b} \approx 10^{-8} \left(\frac{R}{\text{GeV}^{-1}} \right)^{-2} \left(\frac{T_B}{180 \text{ MeV}} \right)^{-3/2} \left(\frac{m}{\text{TeV}} \right)^{1/2}$$

研究目標

- 重い長寿命強粒子Xが存在するときのBBNの計算を行い、観測から存在度・寿命への一般的な制限を導く
- この環境が軽元素の始原組成を説明できるか確認

重い安定強粒子 X^0 存在時のBBN

- 安定バリオン X^0 が存在するとBBNで原子核に捕獲される
(Dicus & Teplitz 1980)
 - ✓ N-X力をN- Λ 力と同様であると仮定
 - ✓ BBNの時期に、大部分のXが ^4He に捕獲され、 $^4\text{He}_X$ 組成はその後不変と仮定
 - ✓ ^2H , ^3H , ^3He のX捕獲割合は $^4\text{He}_X/^4\text{He}$ と等しいと仮定
- 解析的に反応式を解いてBBNを計算
 - Xは現在Beに多く含まれる ($^8\text{Be}_X/^9\text{Be}$ が大きい)
- ^4He を捕獲するXの割合は小さくXは自由状態で残る
(Mohapatra & Teplitz 1998)
 - ◆ 今回の特徴は、Xがとても重いこと
 - ◆ Xが捕獲される割合を仮定せず、ネットワーク計算を行う

モデル

1. 原子核と X^0 の束縛エネルギー

[仮定]

➤ X は spin 0, **charge 0**, mass $m_X \gg 1$ GeV

➤ X が核子と同様の相互作用をする

→ポテンシャルは

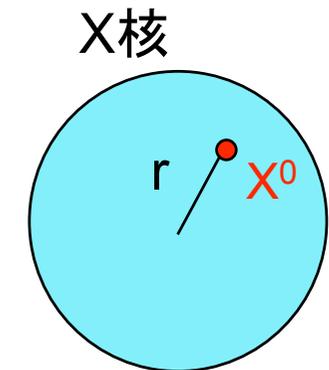
1) N- X 間はn-p系の束縛エネルギーを再現する井戸形

$$V_N(r) = \begin{cases} -25.5 \text{ MeV} & (\text{for } r \leq 2.5 \text{ fm}) \\ 0 & (\text{for } 2.5 \text{ fm} < r) \end{cases}$$

2) 他の原子核はWoods-Saxon型

($V_0=50 \text{ MeV}$, $a=0.6 \text{ fm}$, $R=\langle r_m^2 \rangle^{1/2}$)

$$V_N(r) = -\frac{V_0}{1 + \exp[(r - R)/a]}$$



原子核 A

→ 2体Schrödinger 方程式から束縛エネルギーを求めた

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V(r) - E \right] \psi_m(\mathbf{r}) = 0$$

束縛エネルギーは $\sim O(10 \text{ MeV})$ → 原子核の X 捕獲は宇宙初期に起こる!

2. X存在時の核反応

➤ 非共鳴成分のみ扱う

➤ 束縛エネルギーを考慮して反応のQ-value を導出

i) 放射性X捕獲: $A(X,\gamma)A_X$ 反応

✓ $A(n,\gamma)B$ 反応率を使用

✓ $p(X,\gamma)p_X$, $p_X(p,\gamma)pp_X$, $p_X(n,\gamma)d_X$ は RADCAP (Bertulani 2003) で計算

ii) 放射性中性子捕獲: $A_X(n,\gamma)B_X$ 反応 → E1 hindered

✓ $A(n,\gamma)B$ 反応率の 10^{-3} を使用

iii) 荷電粒子反応:

✓ 熱核反応率で換算質量数のみ補正

✓ Xが付くことによりQ-valueが負になる反応:

普通の核反応断面積から純粹に“核反応”の部分だけを用いるために、
入射と出口チャンネルのクーロン透過ファクターだけ補正

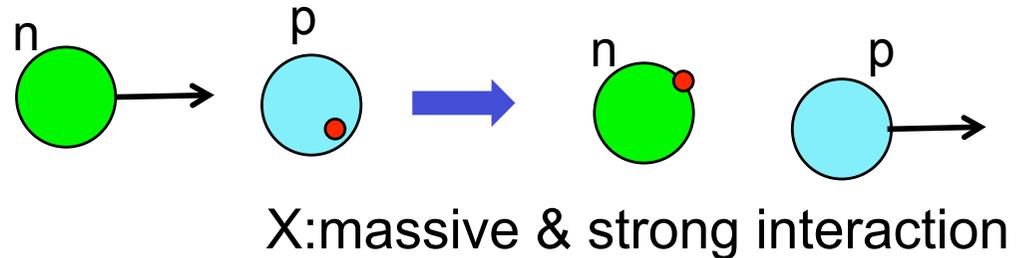
2. X存在時の核反応

iv) $A_X(n,p)B_X$ 反応

✓ $A(n,p)B$ 反応率を使用

v) X移行: $p_X(n,p)n_X$ 反応

✓ ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ 反応率を使用



vi) X移行: $p_X(\alpha,p){}^4\text{He}_X$ 反応

✓ ${}^8\text{B}(\alpha,p){}^{11}\text{C}$ 反応率を使用

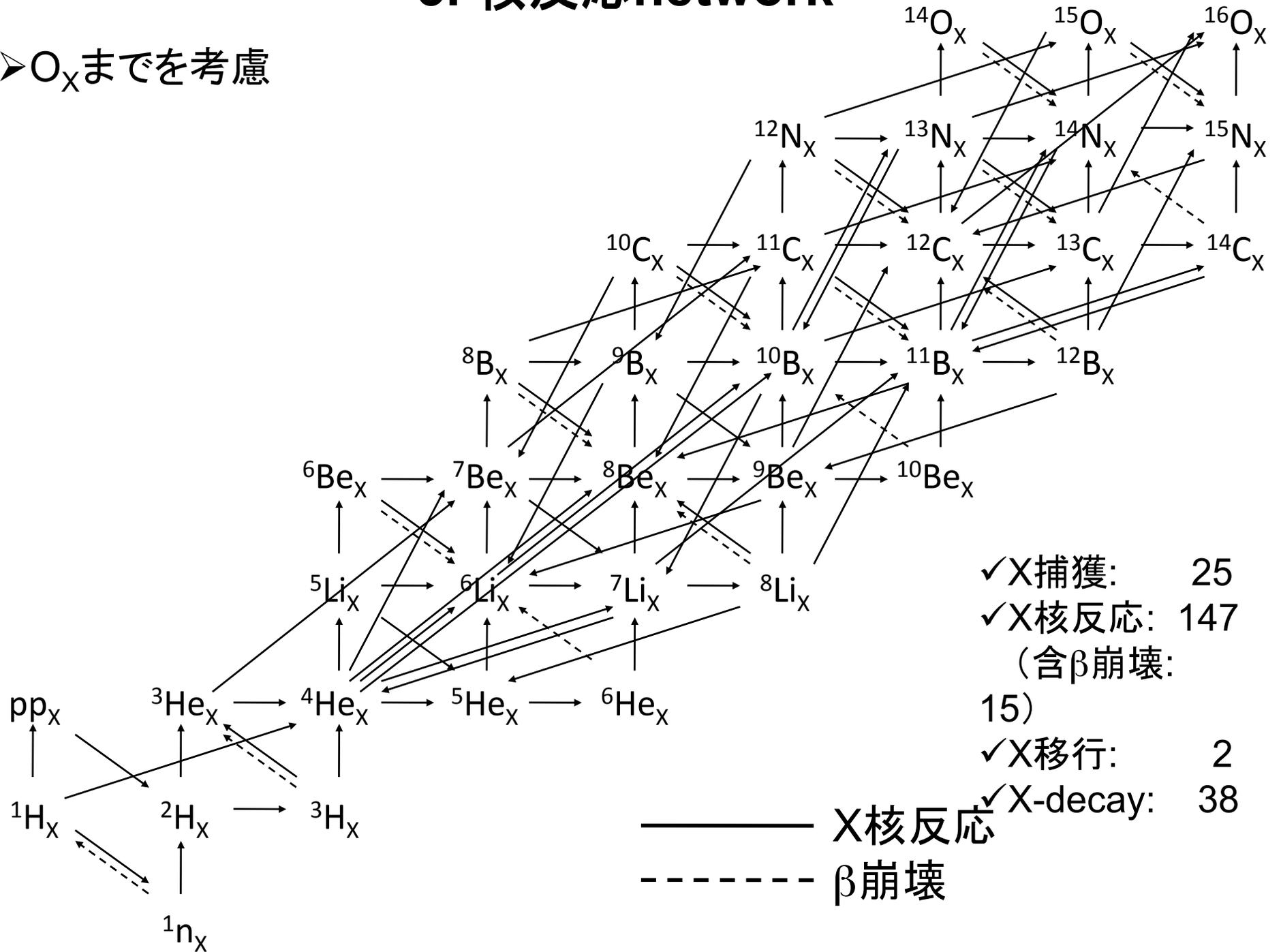
vii) β 崩壊:

✓ SBBNの β 崩壊率を用いQ-valueの変化を考慮し補正

✓ Q-valueが小さい反応は崩壊率が小さいため無視

3. 核反応network

➤ O_x までを考慮

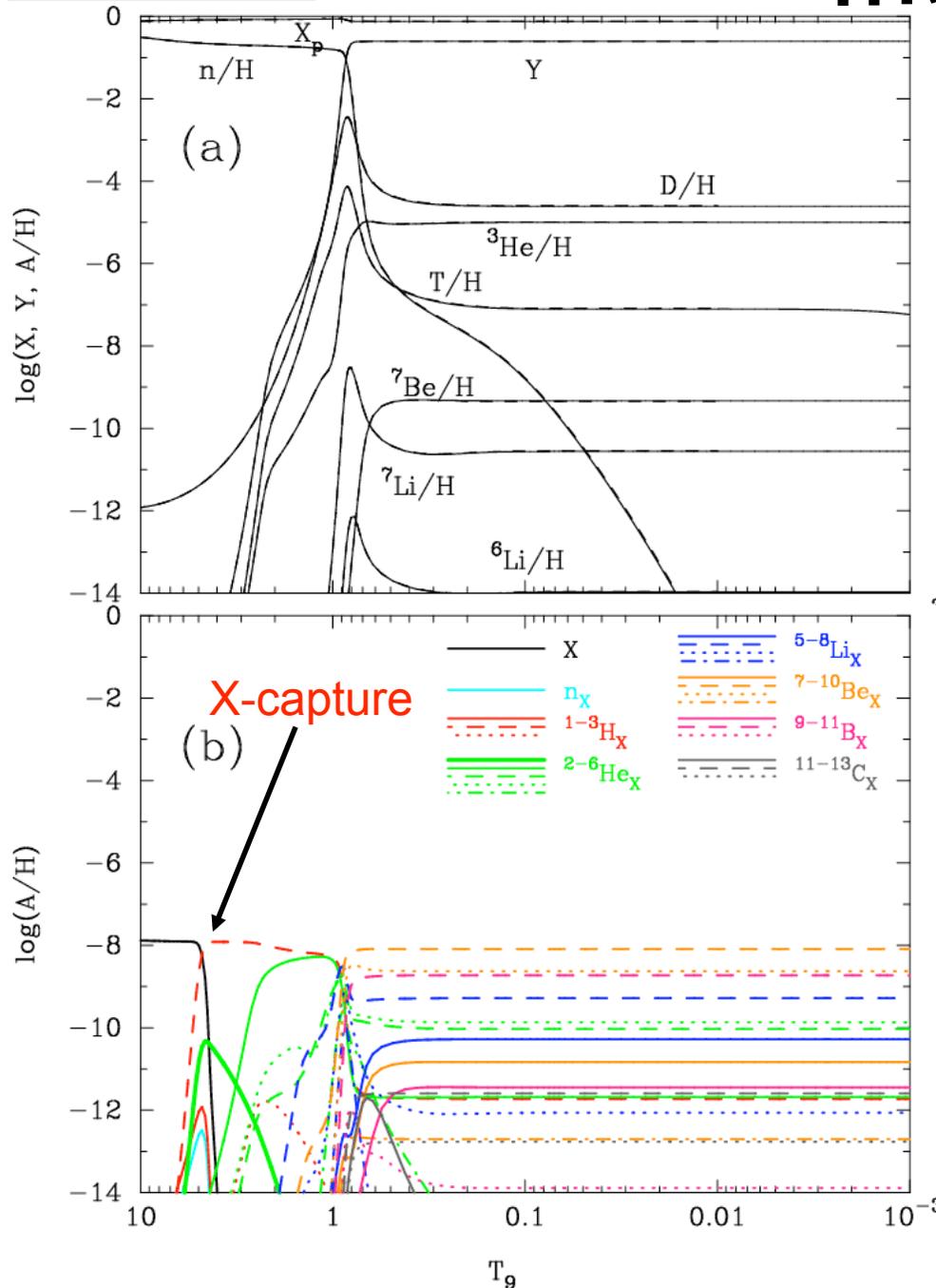


- ✓X捕獲: 25
- ✓X核反応: 147
(含 β 崩壊: 15)
- ✓X移行: 2
- ✓X-decay: 38

————— X核反応
 - - - - - β 崩壊

Abundance

結果



Nuclear flow

◆ $m_x \gg 1\text{GeV}$, $n_x = 10^{-8}n_b$, $\tau_x = \infty$

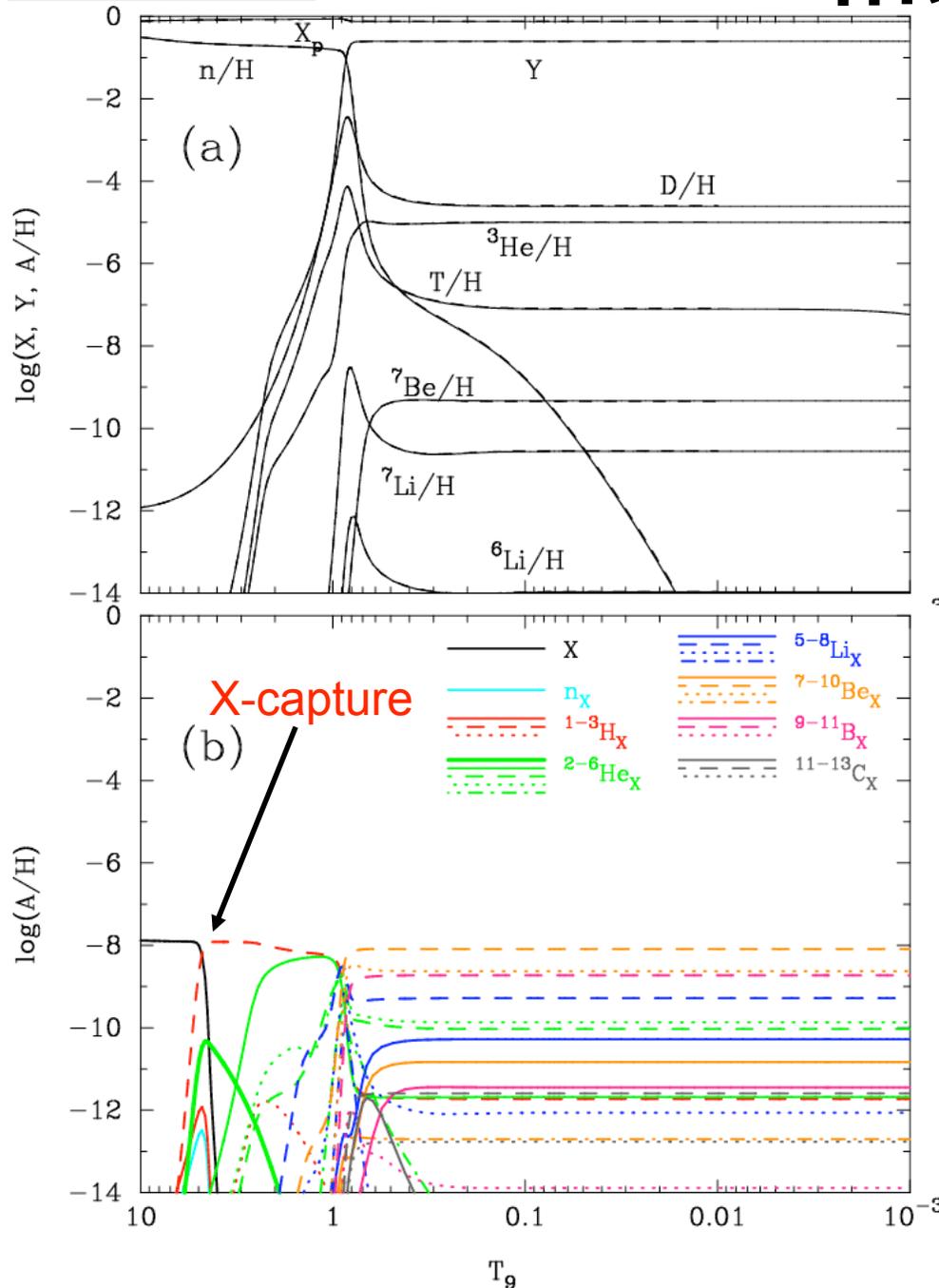
- ✓ $T_9 \sim 5$: Xが核子を捕獲
- ✓ $T_9 \geq 1$: ${}^2\text{H}_x$ と ${}^3\text{He}_x$ が大量に形成
- ✓ $T_9 \sim 1$: dが増えるため(d,p), (d,n)反応が活発になる
→ 重いX核(${}^{13}\text{C}_x$ まで)が合成される

Dicus & Teplitz (1980),
Mohapatra & Teplitz (1998)
の描像と異なる!

温度 $T_9 = T/(10^9 \text{ K})$

Abundance

結果



Nuclear flow

◆ $m_x \gg 1\text{GeV}$, $n_x = 10^{-8}n_b$, $\tau_x = \infty$

- ✓ $T_9 \sim 5$: Xが核子を捕獲
- ✓ $T_9 \geq 1$: ${}^2\text{H}_x$ と ${}^3\text{He}_x$ が大量に形成
- ✓ $T_9 \sim 1$: dが増えるため(d,p), (d,n)反応が活発になる
→ 重いX核(${}^{13}\text{C}_x$ まで)が合成される

➤ 強粒子 X^0 は電磁相互作用しかしないX-より束縛エネルギー・捕獲断面積が大きい
→ 束縛状態がより早く形成

➤ ${}^5\text{Li}_x$ と ${}^5\text{He}_x$ が粒子崩壊に対して安定化され、それらを経由して重い核が合成される

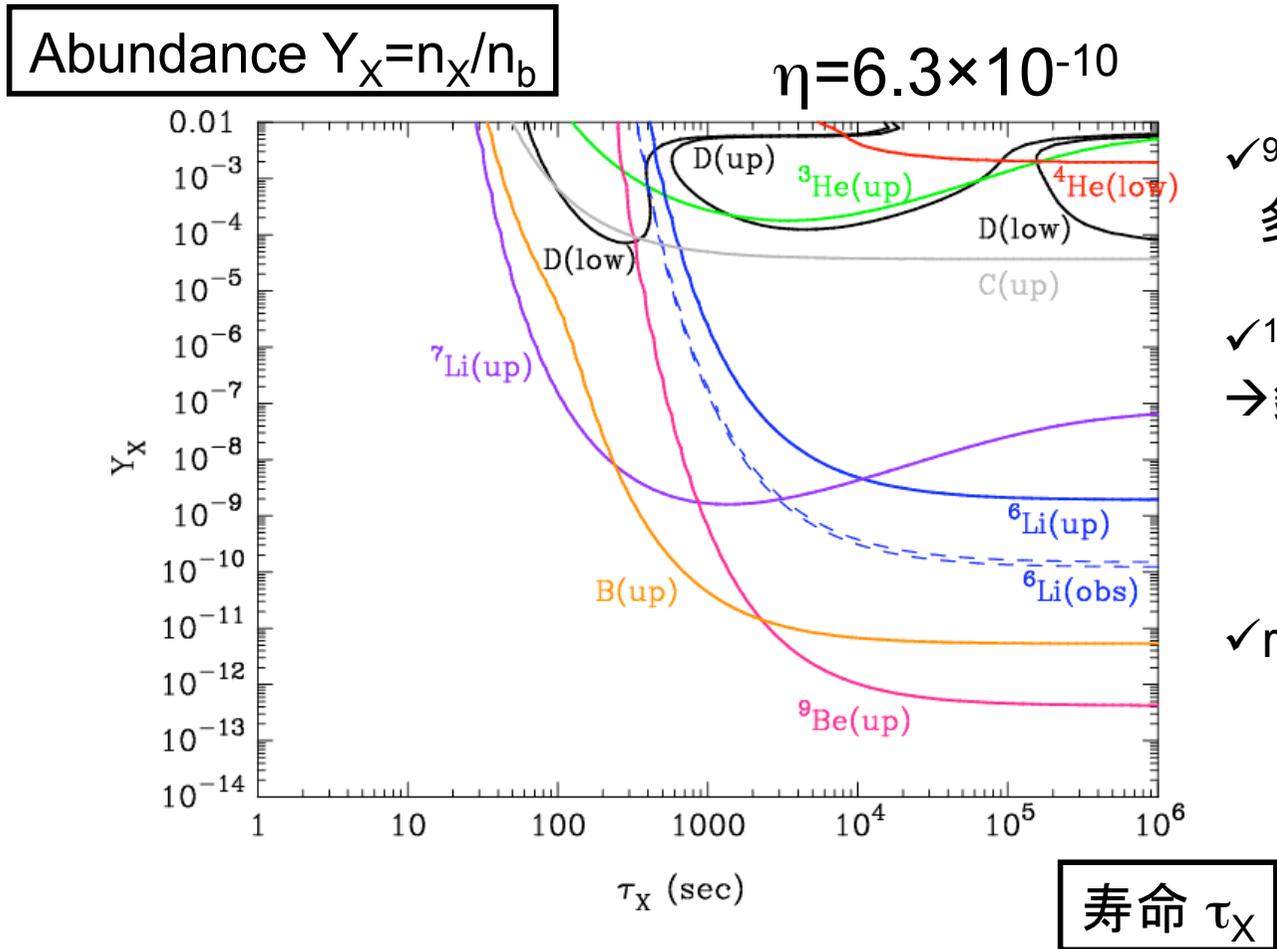
→ X^0 は元素合成に大きな影響を持つ

温度 $T_9 = T/(10^9 \text{ K})$

パラメータサーチ

- ✓ X^0 粒子の崩壊を考慮した計算
- ✓崩壊が引き起こす元素合成は考慮されていない

組成の計算値に対して始原組成への観測的制限の等高線を描いた図



✓ ${}^9\text{Be}$, Bが標準BBNの予言値より多く合成される状況が存在

✓ ${}^{10}\text{B}/{}^{11}\text{B} \sim 10^5$ の割合でBを合成
 →銀河宇宙線(${}^{10}\text{B}/{}^{11}\text{B} \sim 0.4$)や
 超新星 ν -process(${}^{10}\text{B}/{}^{11}\text{B} \ll 1$)
 と異なる

✓relic abundance $Y_X \approx 10^{-8}$
 → $\tau_X \lesssim 200\text{s}$

- ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ 問題への解は見つからなかった
- X^0 粒子への制限は ${}^7\text{Li}$, B, ${}^9\text{Be}$ の低金属量星の観測から与えられる

まとめ

- 長寿命の強い相互作用をする粒子 X^0 がBBNに与える効果を調べた
 - ✓ X^0 が普通の核子と同様の相互作用をすると仮定
 - ✓ 原子核の X^0 捕獲反応とX核の関連する核反応のQ値と反応率を見積
 - ✓ 原子核の X^0 捕獲とX核反応を含むBBNのダイナミカルな計算を実行

[結果]

- BBNの結果
 - ✓ $T_9 \sim 5$ で X^0 が核子を捕獲
 - ✓ $T_9 \sim 1$ でDが合成され、D捕獲で重いX核が合成
 - ✓ X核が高温で合成される
 - 効果的に核反応が起こり重いX核が大量に合成される
- ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ 問題の解は見つからなかった
- X^0 粒子の寿命と組成に対する制限を導いた
 - relic abundance $n_X/n_b \sim 10^{-8} \rightarrow \tau_X \lesssim 200\text{s}$