

エキゾチック負電荷レプトン・バリオンによる
ビッグバン元素合成反応の
核データ(理論計算)の必要性について

上村 正康 (理研 / 九大)

Catalyzed BBN

II

エキゾチック負電荷レプトン・バリオンによる

ビッグバン元素合成反応の

が触媒する
catalyze

核データ(理論計算)の必要性について

宇核連の戦略の中に入るかどうか？

隠れた
キーワード

muon catalyzed fusion

ミュオン触媒核融合

ビッグバン元素合成の最新のレビュー論文 2009年2月

Physics Reports 472 (2009) 1–76



Contents lists available at ScienceDirect

Physics Reports

journal homepage: www.elsevier.com/locate/physrep



Primordial nucleosynthesis: From precision cosmology to fundamental physics

Fabio Iocco^{a,1}, Gianpiero Mangano^b, Gennaro Miele^{b,c,*}, Ofelia Pisanti^b,
Pasquale D. Serpico^{d,2}

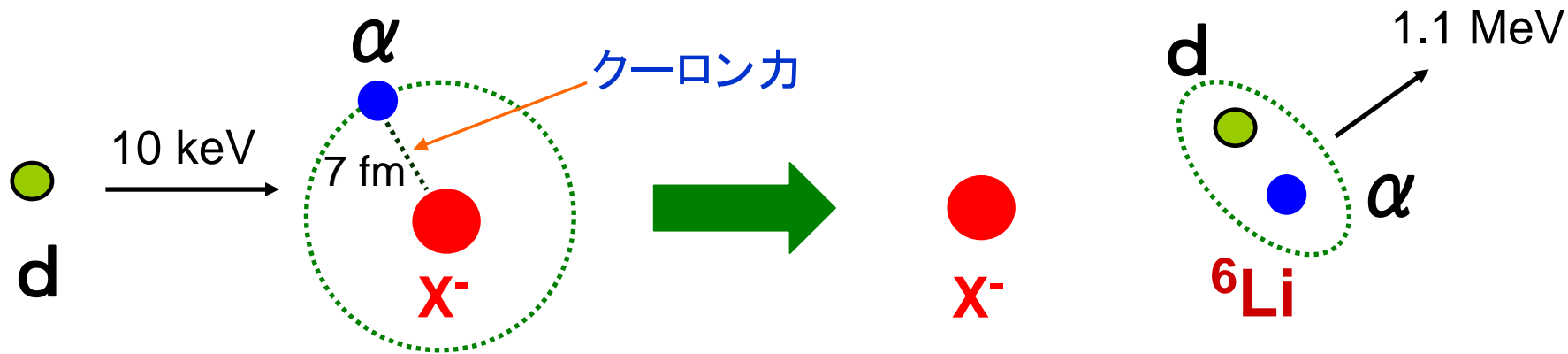
Contents

1. Introduction.....
2. Standard cosmology.....
3. Big bang nucleosynthesis
4. Observational abundances
5. Standard BBN theoretical predictions versus data...
6. BBN and neutrino physics.....
7. Inhomogeneous nucleosynthesis.....
8. Constraints on fundamental interactions.....
9. Massive particles & BBN
- 9.1. Cascade nucleosynthesis
- 9.2. Catalyzed BBN.....
10. Conclusions.....

Catalyzed BBN

長寿命の重い負電荷レプトン(X^-) が
触媒するビッグバン元素合成反応

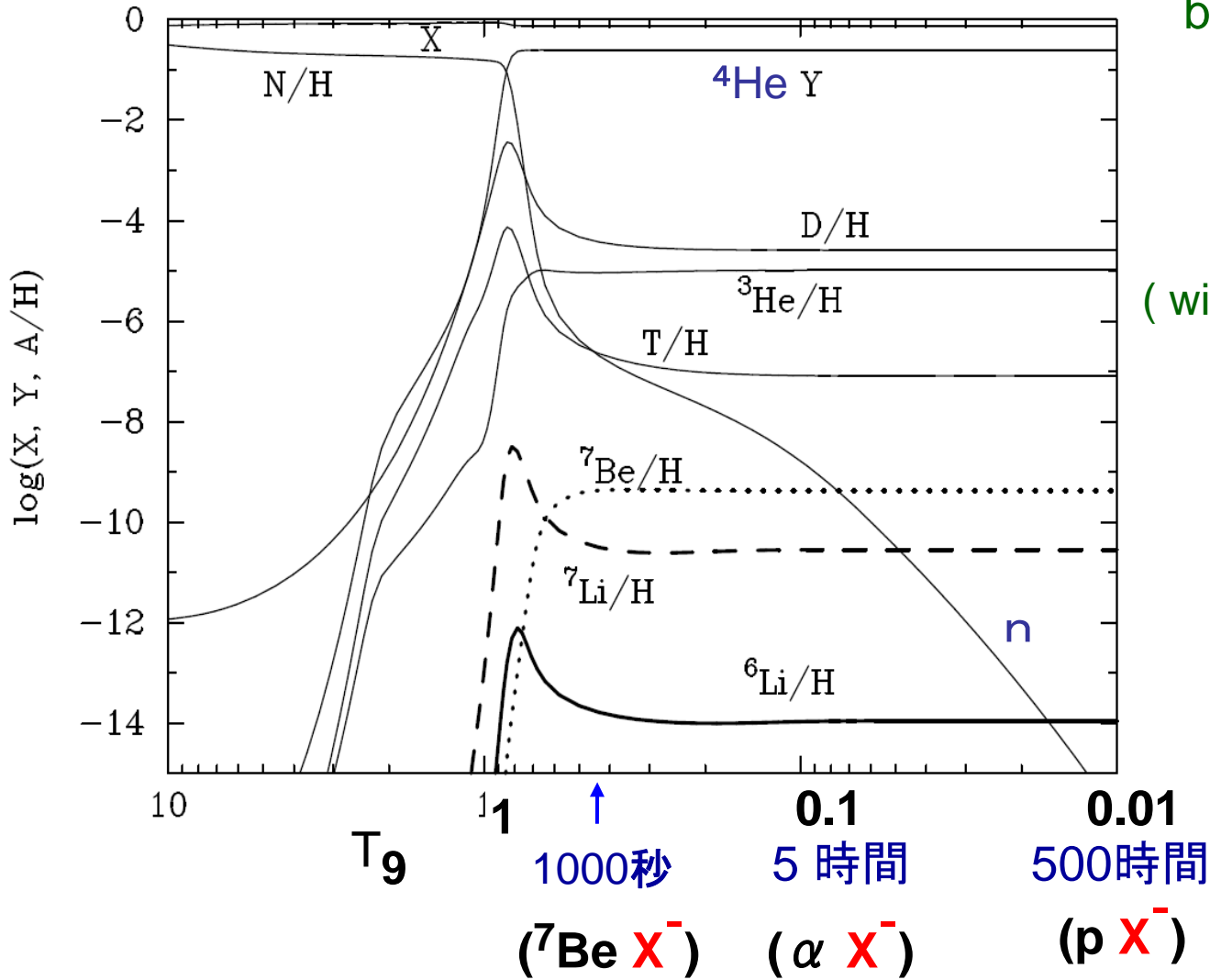
具体例 (最も重要そうなもの: ${}^6\text{Li}$ 合成反応) M. Pospelov (2006)の提案



どのような時間帯の話か？

X^- との束縛状態(エキゾティック原子)が
安定に作られる時間帯

by 日下部



(with $\frac{n_B}{n_\gamma} = 6.0 \times 10^{-10}$)

CMB-derived

↑
中性原子の活躍(?)
Late-time Big Bang
と呼ばれる

(Big-Bang) Primordial Nucleosynthesis and Particle Physics

(ビッグバン元素合成 と 素粒子物理)

という分野からの要請:

できるだけ多くの Catalyzed BBN 反応について
反応率を計算して、
BBN network 計算のために提供して欲しい。

Catalyzed BBN

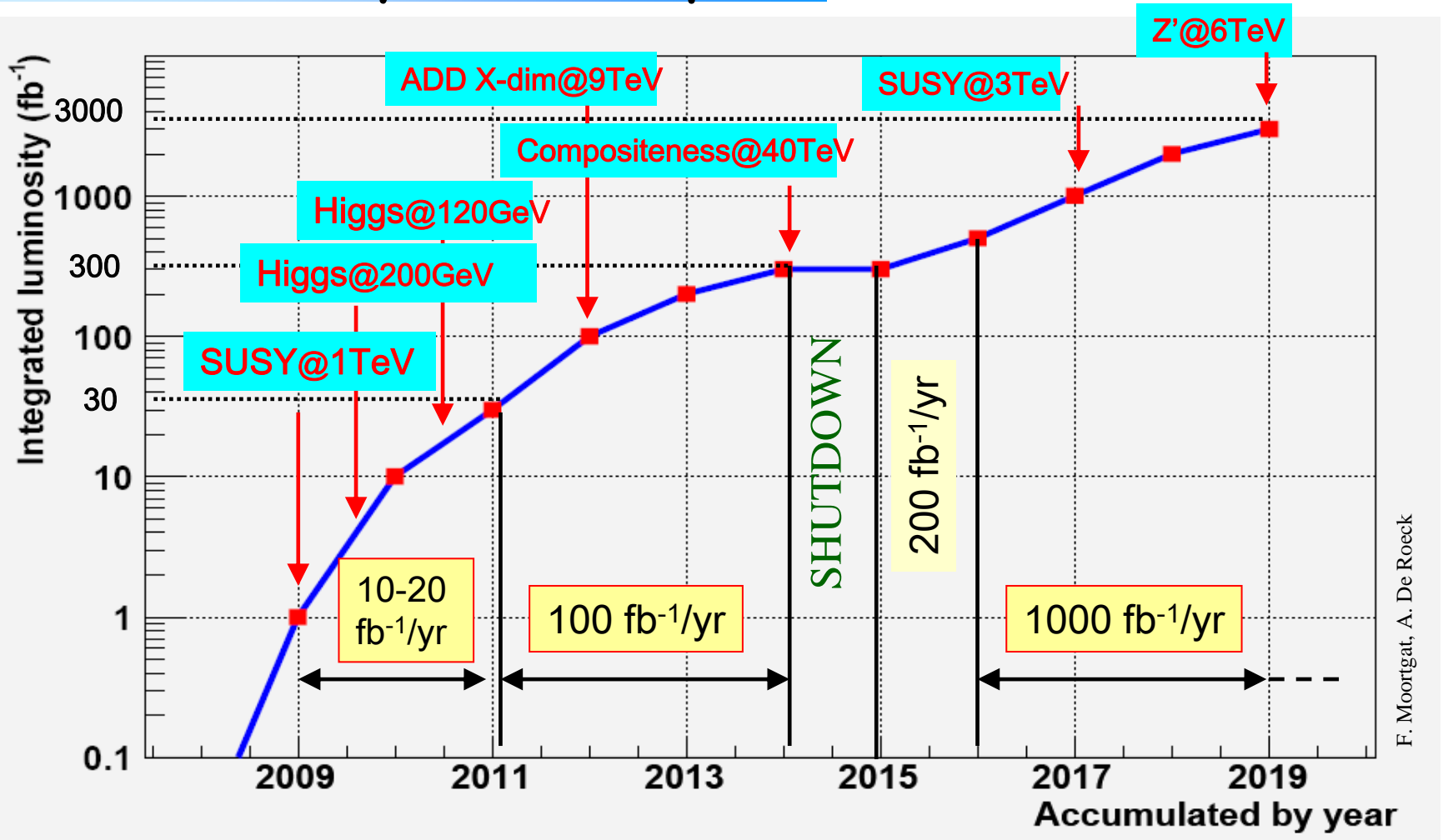
エキゾチック負電荷レプトンが触媒する

ビッグバン元素合成反応

有力候補 = 超対称粒子 **スタウ stau** ← LHC

SUSY particle

Discovery Roadmap?



SUSY@1TeV の有力候補 = 超対称粒子スタウ stau

標準模型粒子 ↔ 超対称性パートナー

τ tau (+, -) ↔ $\tilde{\tau}$ stau (+, -)

NLSP (長寿命)

↓ ← 重力相互作用崩壊

G graviton ↔ \tilde{G} gravitino

LSP

↑
ダークマターの候補

(Lightest SUSY Particle)

Long-Lived Staus at the CMS detector at LHC

a stopper-detector placed next to

Koichi Hamaguchi (Tokyo U.)

at DESY mini-Workshop, Dec.'06

based on the works with

M.M.Nojiri, A.de Roeck (hep-ph/0612060 today!);

M.M.Nojiri, Y.Kuno, T.Nakaya;

W.Buchmüller, M.Ratz, T.Yanagida;

+

M.Ibe;

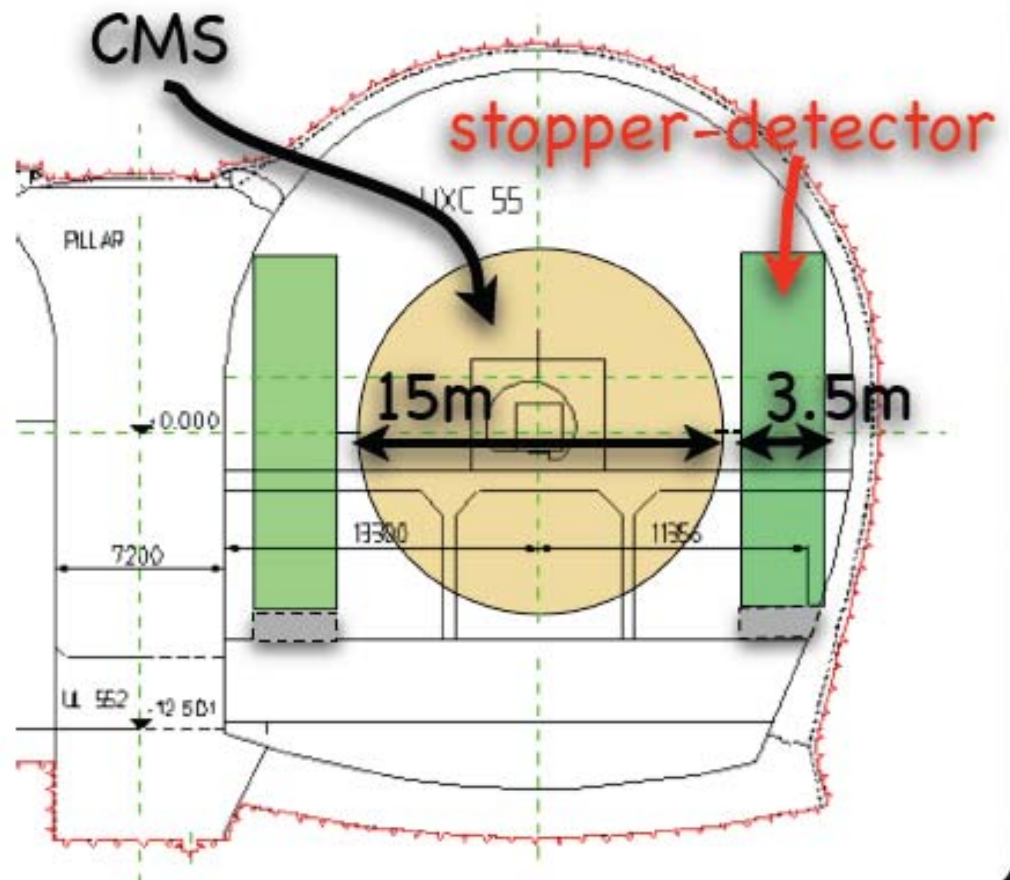
A.Brandenburg, L.Covi, L.Roszkowski, F.D.Steffen.

浜口、野尻、久野、中屋、柳田

stopper-detector

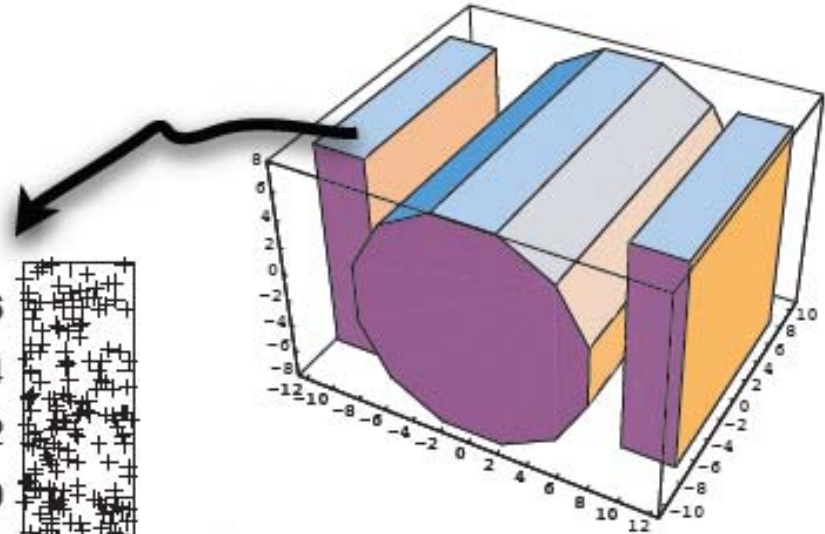
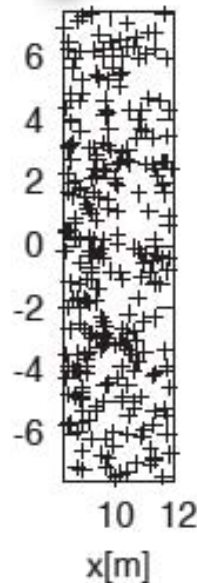
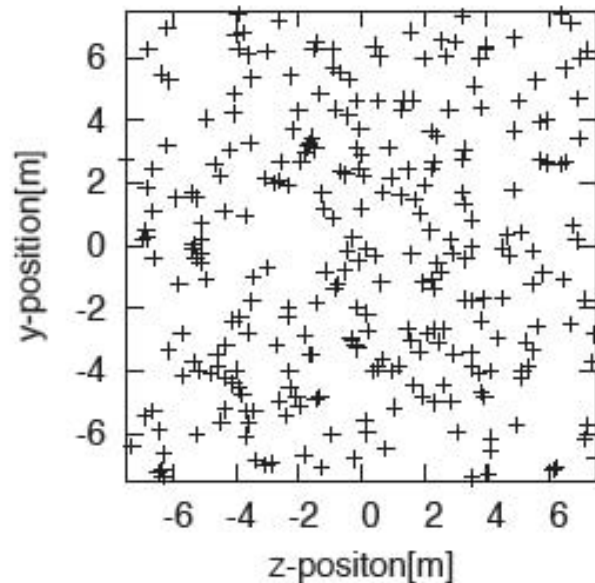
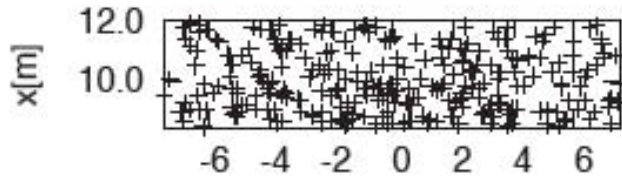
We assume two stoppers next to CMS.

Hamaguchi, Nojiri, De Roeck'06



→ maybe possible to install stopper-detectors.

distribution of stopped stau



$\Lambda = 40$ TeV GM point

Hamaguchi, Nojiri,
De Roeck, '06

Summary

- A stopper-detector seems necessary to study the decay of a long-lived charged particle.
- O(1)kton stopper-detector may be placed next to the CMS detector.
- Stau lifetime is measured well.
- If $m_{\tilde{G}} > (0.2 - 0.3)m_{\tilde{\tau}}$, the mass reconstruction (and hence M_p measurement !) may be possible.
- 3-body can discriminate gravitino from axino.
- Anyway, if long-lived charged particles are seen at the LHC,..... trap them!!

ビッグバン元素合成の研究で想定されている **スタウ** の性質

1) 質量: $\gtrsim 100 \text{ GeV}$

2) 電荷: -1

3) 寿命: 1000秒 $\sim 10^6$ 秒(1年) 程度

4) 相互作用: クーロン力 (+弱い相互作用 ---使わない)

----- ここ一般化 -----

「ビッグバン元素合成における役割」という観点から言えば、
以上の性質を持っている粒子(長寿命の重い負電荷レプトン)
であれば、「**スタウ**」であることを問わない。

そこで、通常は、**X⁻** 粒子という名前で代表させている。

何が面白いのか？

ビッグバン元素合成理論の成功の陰で

スタウが触媒する核反応の助けを借りて、これを解決する。

未解決の難題は、

- 1) ${}^6\text{Li}$ 理論値 / 観測量 $\sim 1 / 1000$
- 2) ${}^7\text{Li}$ 理論値 / 観測量 ~ 3

新しい課題:

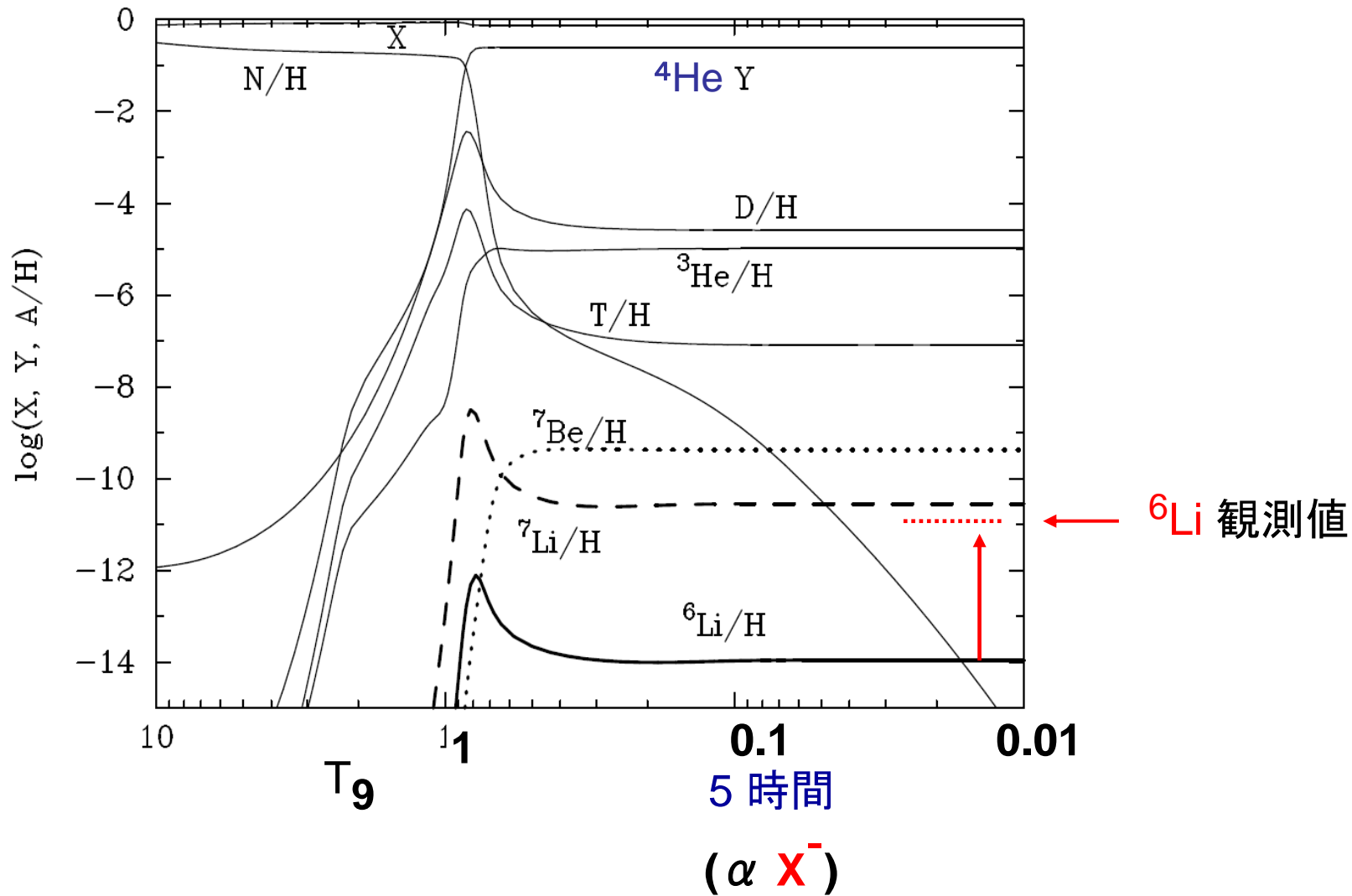
- 3) 観測量 ${}^9\text{Be} / \text{H} \lesssim 2.1 \times 10^{-13}$ ← 最近、詳しく決まってきた
(ビッグバンで ${}^9\text{Be}$ ができ過ぎてはいけない)

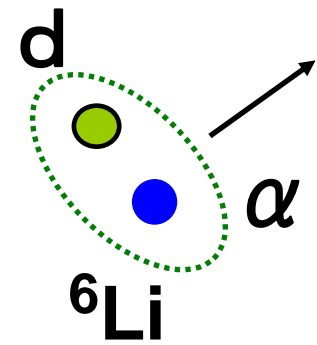
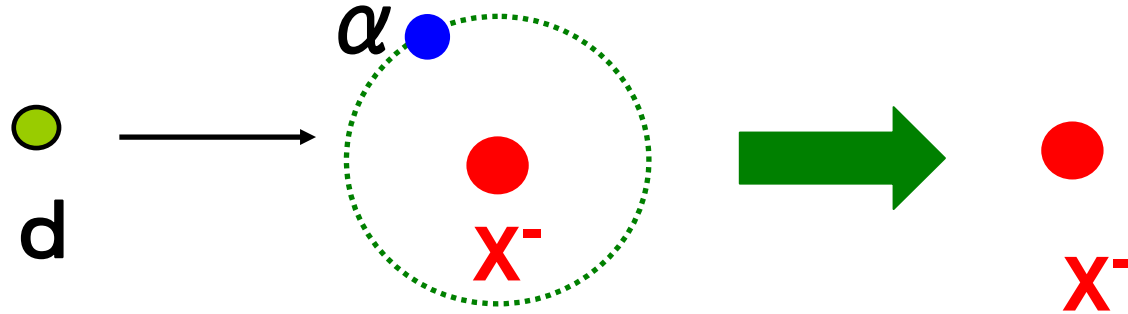
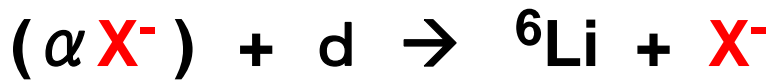
- 4) Late-time Big Bang における中性原子 ($p X^-$) の活躍
- 5)

1) ${}^6\text{Li}$ 問題

理論値 / 観測量 $\sim 1 / 1000$

M. Pospelov (2006) の解決案:





スタンダードなビッグバンでは



他の元素合成反応に比べ
断面積が極度に小さい

M. Pospelov (2006) :

X^- 触媒反応は 10の8乗倍大きい(S-factor)

本当か？

${}^6\text{Li}$ 問題を解決できるが、しかし、 X^- ができ過ぎる可能性(逆手に取る)。

→ X^- の寿命や宇宙初期での存在量 に制限を付ける

何が面白いのか？

未解決の難題は、

1) ${}^6\text{Li}$ 理論値 / 観測量 $\sim 1 / 1000$

2) ${}^7\text{Li}$ 理論値 / 観測量 ~ 3

3) 観測量 ${}^9\text{Be} / \text{H} \lesssim 2.1 \times 10^{-13}$

4) Late-time Big Bang における中性原子 ($p X^-$) の活躍

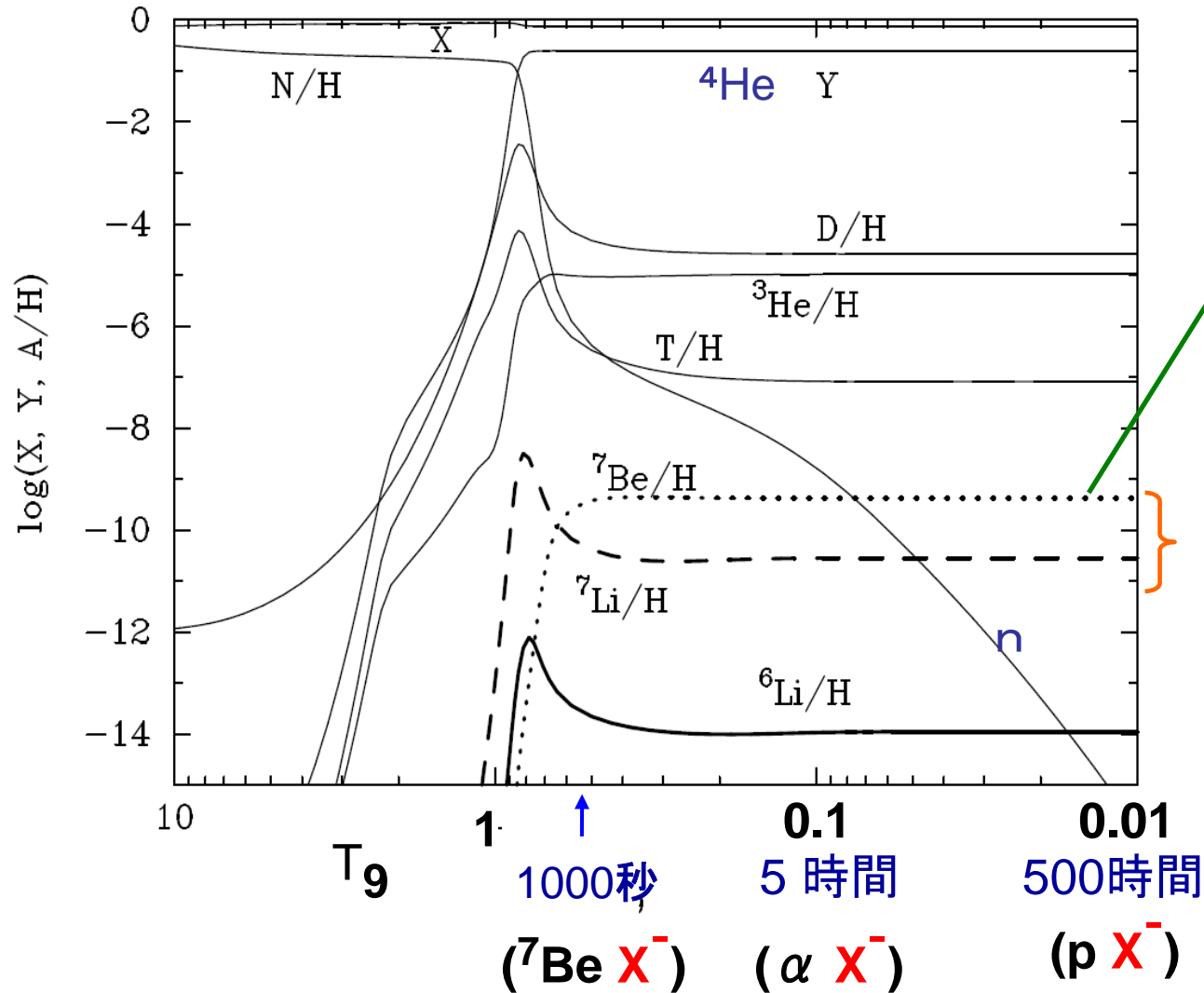
スタウが触媒する核反応の助けを借りて、これを解決する。

元素ができ過ぎるなら

- ・スタウの寿命を短くする
- ・スタウの存在量を減らす

2) ${}^7\text{Li}$ 問題

理論値 / 観測量 ~ 3



${}^7\text{Be}$ は、この後、
電子を捕獲して
 ${}^7\text{Li}$ となる

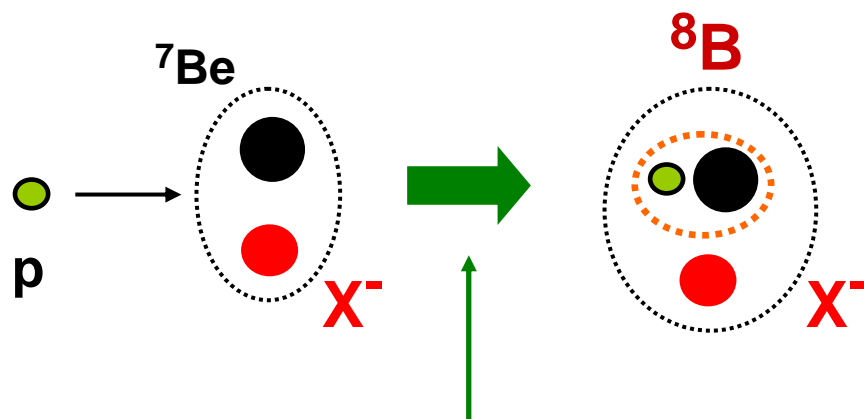
${}^7\text{Li}$ (3倍でき過ぎ)

${}^7\text{Li}$ 問題

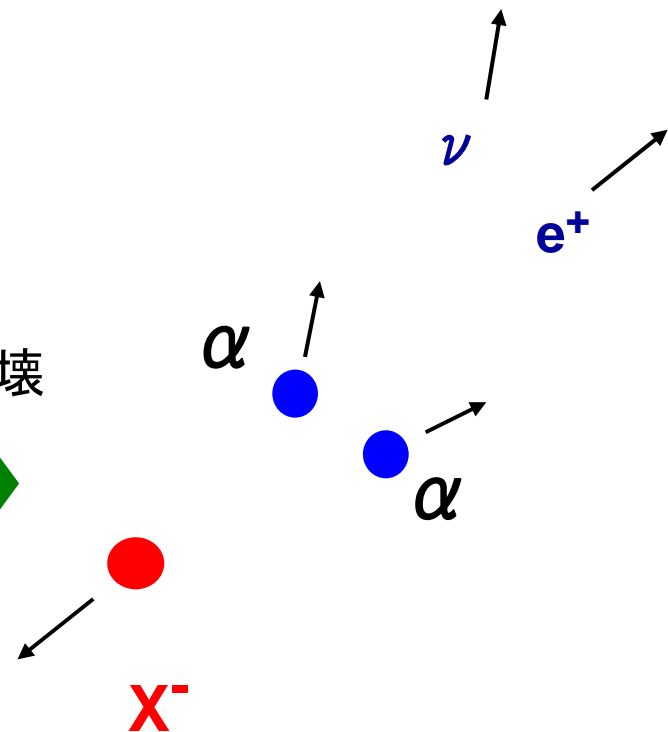
${}^7\text{Be}$ を減らせ

M. Pospelov et al. (2007) の解決案:

${}^7\text{Be}$ を減らせ



β 崩壊



太陽ニュートリノと同じ

絶妙な共鳴反応が起こり、
 ${}^7\text{Be}$ を効果的に減らせる

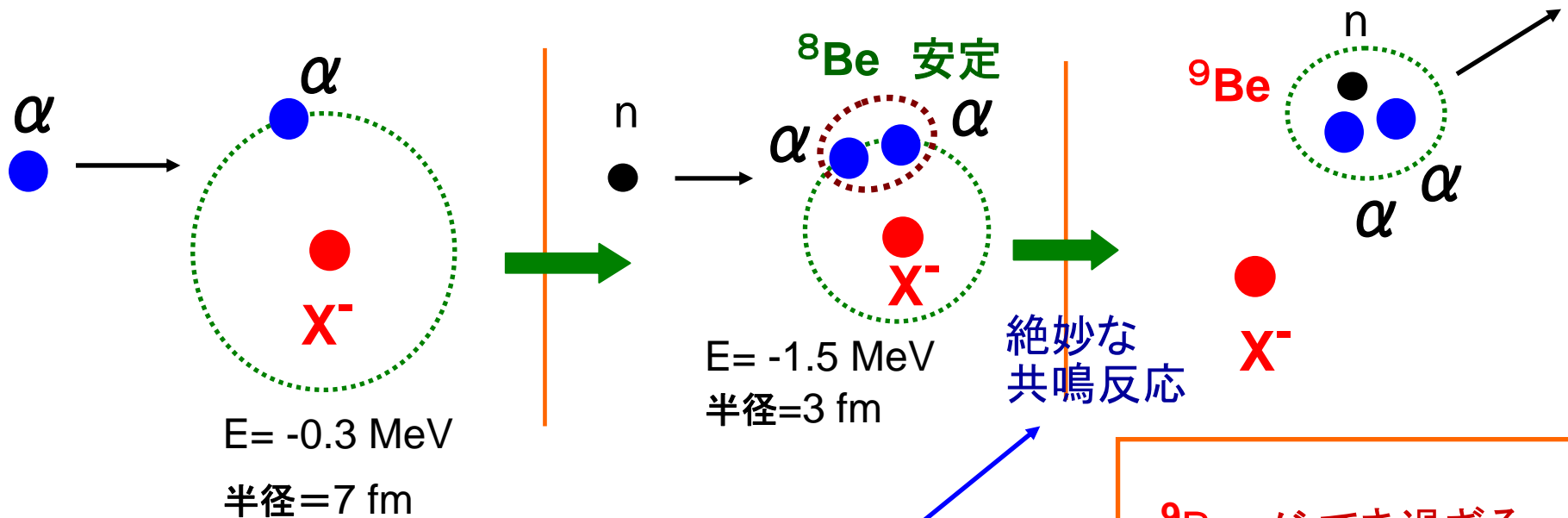
本当か？

3) ${}^9\text{Be}$ 問題 観測量 ${}^9\text{Be} / \text{H} \lesssim 2.1 \times 10^{-13}$

M. Pospelov et al. (2008)

スタンダード ビッグバン : ${}^8\text{Be}$ がすぐ α 崩壊する ($\sim 10^{-12}$ 秒)。

X^- 触媒ビッグバン反応 :



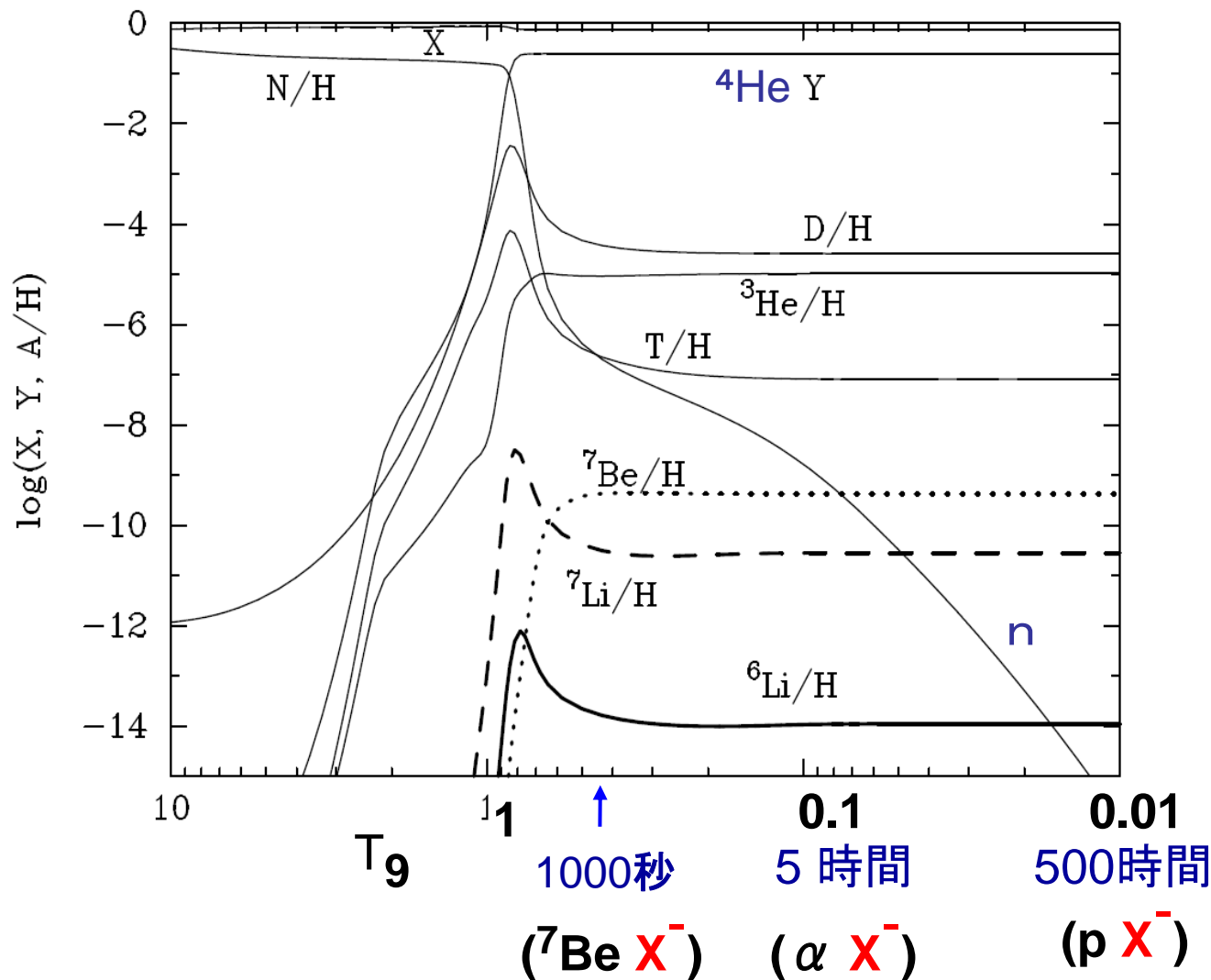
本当か？

${}^9\text{Be}$ ができ過ぎる
↓
 X^- に制限を付ける

4) **Late-time Big Bang** における
中性原子 ($p X^-$) の活躍?

$T_9 = 0.01$

500時間ごろ



中性原子の活躍(?)
Late-time Big Bang
と呼ばれる

Jedamzikの主張(2008)

(p X⁻) : 中性なので、あたかも中性子のように、他の原子核に近づき易い。



これらの反応が強くなり、standard Big bang で合成された⁶Li, ⁷Li, ⁷Be元素量の大部分を破壊する。BBN シナリオが崩れる。

スタウ(X⁻)の寿命 < 数百時間 を要請

本当か？

何が面白いのか？

この核反応計算は間違っていないか？

未解決の難題は、

1) ${}^6\text{Li}$ 理論値 / 観測量 $\sim 1 / 1000$

2) ${}^7\text{Li}$ 理論値 / 観測量 ~ 3

3) 観測量 ${}^9\text{Be} / \text{H} \lesssim 2.1 \times 10^{-13}$

4) Late-time Big Bang における

中性原子 ($p X^-$) の活躍

Dark Matter \leftarrow ??? グラビティーノの質量

スタウが触媒する核反応
の助けを借りて、
これを解決する。

元素ができ過ぎるなら
・スタウの寿命を短くする
・スタウの存在量を減らす

素粒子スタウの性質に
宇宙現象から制約を与える

(スタウの寿命)

LHC実験

核物理の任務:

1) 既に、Catalyzed BBNの論文で使われた
種々の反応の断面積(反応率)----について、
計算法・結果の数値をチェックする。

2)

3)

4)

アイデアはどれも
非常に素晴らしい。

しかし、ほとんどは、
* 願望に引っ張られた
危うい計算
* 全く適用範囲外の
近似計算(DWBA)

しかし、
一旦 数字を得たら、
由来を忘れて(?)、
どんどん強い主張を
して行く。

Nuclear uncertainty

という理由の下に、危ない仮定を導入する。

「核物理ではよく解っていない」

しかし、多くの場合は、「彼らが核物理をよく解っていない」

(例)

共鳴反応は、大きな断面積を出す(共鳴の位置に大きく依存)。

(X^- 粒子 + 原子核)系 の共鳴状態の位置を、
nuclear uncertainty という理由をつけて、
「うまく細工すれば」、望ましい効果が得られる

----- という誘惑に駆られるらしい。

核物理の任務:

- 1) 既に、Catalyzed BBNの論文で使われた種々の反応の断面積(反応率)----について、計算法・結果の数値をチェックする。
- 2) 同じものを、量子力学の3体(4体)問題として、理論で精密に計算する。
- 3)
- 4)

一部分は既に発表:

1) “Stau-catalyzed ${}^6\text{Li}$ production in big-bang nucleosynthesis”

K. Hamaguchi, T. Hatsuda, M. K., Y. Kino and T. Yanagida

浜口

初田

上村

木野

柳田

Phys. Letters B **650** (2007) 268 (arXiv: 0702274 [hep-ph]). 2007年2月

2) “Big-bang nucleosynthesis reactions catalyzed by long-lived negatively charged leptonic particle”

M. K., Y. Kino and E. Hiyama

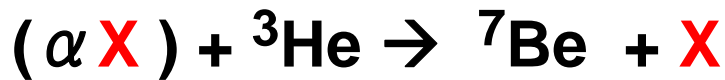
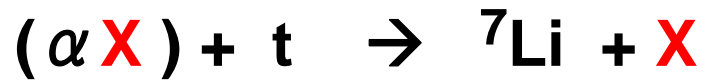
上村

木野

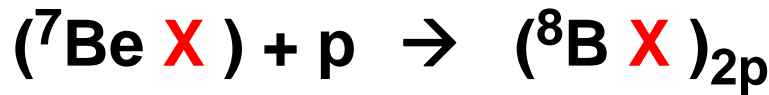
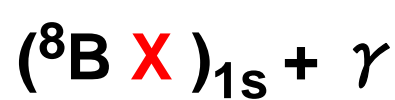
肥山

Prog. Theor. Phys. **121** (2009) 1059, (arXiv: 0809.4772 [nucl-th]).

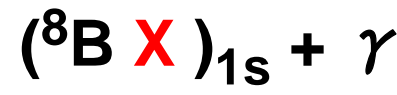
(40ページの長編)



} ${}^7\text{Li} + {}^7\text{Be}$ の 合成

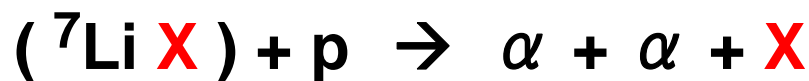


共鳴



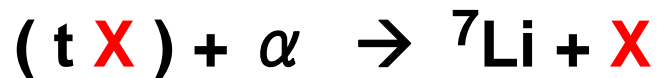
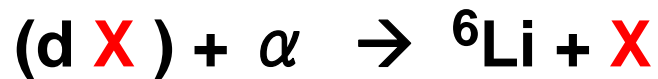
} ${}^7\text{Li} + {}^7\text{Be}$
の 破壊

β 崩壊



} ${}^6\text{Li}, {}^7\text{Li}$ の 合成

中性原子による Late-time ビッグバン元素合成



Late-timeにおける
元素の合成



Late-timeにおける
元素の破壊



荷電移行反応

次表のように、従来の論文に登場したCBBN反応について、
反応率を発表し、BBN network計算向けに提供した

Table III. Summary of the calculated reaction rates of CBBN reactions obtained by the three-body calculation. The first three are for $T_9 \lesssim 0.2$ and the others are for $T_9 \lesssim 0.5$.

Reaction	Reaction rate ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1} \text{mol}^{-1}$)	
<i>non-resonant</i> reaction		
a) $(\alpha X^-) + d \rightarrow {}^6\text{Li} + X^-$	$2.78 \times 10^8 T_9^{-\frac{2}{3}} \exp(-5.33 T_9^{-\frac{1}{3}}) (1 - 0.62 T_9^{\frac{2}{3}} - 0.29 T_9)$	
b) $(\alpha X^-) + t \rightarrow {}^7\text{Li} + X^-$	$1.4 \times 10^7 T_9^{-\frac{2}{3}} \exp(-6.08 T_9^{-\frac{1}{3}}) (1 + 1.3 T_9^{\frac{2}{3}} + 0.55 T_9)$	
c) $(\alpha X^-) + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + X^-$	$9.4 \times 10^7 T_9^{-\frac{2}{3}} \exp(-9.66 T_9^{-\frac{1}{3}}) (1 + 0.20 T_9^{\frac{2}{3}} + 0.05 T_9)$	
d) $({}^6\text{Li}X^-) + p \rightarrow \alpha + {}^3\text{He} + X^-$	$2.6 \times 10^{10} T_9^{-\frac{2}{3}} \exp(-6.74 T_9^{-\frac{1}{3}})$	
e) $({}^7\text{Li}X^-) + p \rightarrow \alpha + \alpha + X^-$	$3.5 \times 10^8 T_9^{-\frac{2}{3}} \exp(-6.74 T_9^{-\frac{1}{3}}) (1 + 0.81 T_9^{\frac{2}{3}} + 0.30 T_9)$	
f) $({}^7\text{Be}X^-) + p \rightarrow ({}^8\text{B}X^-) + \gamma$	$2.3 \times 10^5 T_9^{-\frac{2}{3}} \exp(-8.83 T_9^{-\frac{1}{3}}) (1 + 1.9 T_9^{\frac{2}{3}} + 0.54 T_9)$	
<i>resonant</i> reaction		
g) $({}^7\text{Be}X^-) + p \rightarrow ({}^8\text{B}X^-)_{2p}^{\text{res.}}$	$1.37 \times 10^6 T_9^{-\frac{3}{2}} \exp(-2.28 T_9^{-1})$	$m_X = 50\text{GeV}$
$\rightarrow ({}^8\text{B}X^-) + \gamma$	$1.44 \times 10^6 T_9^{-\frac{3}{2}} \exp(-2.15 T_9^{-1})$	$m_X = 100\text{GeV}$
	$1.48 \times 10^6 T_9^{-\frac{3}{2}} \exp(-2.04 T_9^{-1})$	$m_X = 500\text{GeV}$
	$1.51 \times 10^6 T_9^{-\frac{3}{2}} \exp(-2.01 T_9^{-1})$	$m_X \rightarrow \infty$

Table II. Calculated cross sections and reaction rates of the late-time BBN reactions induced by the neutral bound states. The rates (in units of $\text{cm}^3 \text{s}^{-1} \text{mol}^{-1}$) are available for $T_9 \lesssim 0.05$.

Reaction	cross section (b)				reaction rate
	0.01 keV	0.1keV	1 keV	10 keV	
a) charge-exchange reaction					
$(pX^-) + \alpha \rightarrow (\alpha X^-)_{3\ell} + p$	8.4×10^3	2.2×10^3	7.8×10^2	7.5×10^1	1.0×10^{10}
$(dX^-) + \alpha \rightarrow (\alpha X^-)_{2\ell} + d$	3.1×10^3	9.1×10^2	2.0×10^2	2.1×10^1	3.5×10^9
$(tX^-) + \alpha \rightarrow (\alpha X^-)_{2\ell} + t$	8.3×10^3	1.9×10^3	3.2×10^2	2.5×10^1	7.6×10^9
b) α -transfer reaction					
$(dX^-) + \alpha \rightarrow {}^6\text{Li} + X^-$	9.6×10^0	3.0×10^0	6.9×10^{-1}	6.4×10^{-1}	1.1×10^7
$(tX^-) + \alpha \rightarrow {}^7\text{Li} + X^-$	3.5×10^{-1}	1.1×10^{-1}	2.7×10^{-2}	3.0×10^{-2}	4.3×10^5
c) Li-Be destruction					
$(pX^-) + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^3\text{He} + X^-$	1.8×10^2	5.5×10^1	1.1×10^1	2.8×10^0	1.6×10^8
$(pX^-) + {}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + \alpha + X^-$	3.8×10^0	1.7×10^0	7.7×10^{-1}	1.6×10^{-1}	5.5×10^6
$(pX^-) + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + X^-$	4.8×10^{-1}	3.2×10^0	5.3×10^{-1}	5.5×10^{-2}	5.2×10^6

我々の論文のインパクト

2008.9 投稿



← 我々の第2論文のプレプリ

2009.2 出版

ビッグバン元素合成の 最新のレビュー論文 2009年2月

Physics Reports 472 (2009) 1–76



Contents lists available at ScienceDirect

Physics Reports

journal homepage: www.elsevier.com/locate/physrep



Primordial nucleosynthesis: From precision cosmology to fundamental physics

Fabio Iocco^{a,1}, Gianpiero Mangano^b, Gennaro Miele^{b,c,*}, Ofelia Pisanti^b,
Pasquale D. Serpico^{d,2}

Contents

2008.9 投稿



2009.2 出版

9.2. Catalyzed BBN の全面書き換え

1. Introduction.....
2. Standard cosmology.....
3. Big bang nucleosynthesis
4. Observational abundances
5. Standard BBN theoretical predictions versus data....
6. BBN and neutrino physics.....
7. Inhomogeneous nucleosynthesis.....
8. Constraints on fundamental interactions.....
9. Massive particles & BBN
- 9.1. Cascade nucleosynthesis
- 9.2. Catalyzed BBN.....
10. Conclusions.....

核物理の任務:

1) 既に、Catalyzed BBNの論文で使われた
種々の反応の断面積(反応率)----について、
計算法・結果の数値をチェックする。

2) 同じものを、量子力学の3体(4体)問題
として、理論で精密に計算する。

3) 未だ計算されていない反応の
断面積(反応率)を計算する。

特に、新しい共鳴状態を探し出す

4) データベースとして 系統的に整備して、
catalyzed BBNのネットワーク計算に提供する。



これからの課題

Effect of Long-lived Strongly Interacting Relic Particles on Big Bang Nucleosynthesis

Motohiko Kusakabe^{1,2*†‡}, Toshitaka Kajino^{1,2,3}, Takashi Yoshida^{2§} and Grant J. Mathews⁴

arXiv:0906.3516v1 [hep-ph] 18 Jun 2009

日下部さんから借用

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)

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]

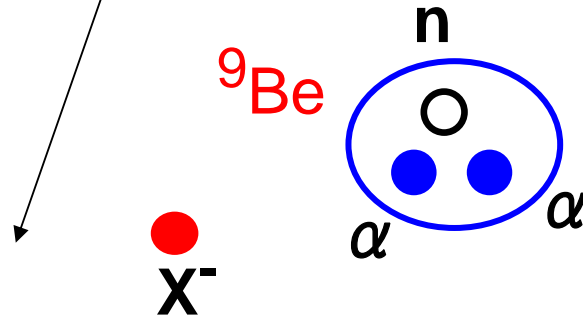
- BBNの結果
 - ✓ $T_9 \sim 5$ で X^0 が核子を捕獲
 - ✓ $T_9 \sim 1$ で D が合成され、 D 捕獲で重い X 核が合成
 - ✓ X 核が高温で合成される
 - 効果的に核反応が起こり重い X 核が大量に合成される
- ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ 問題の解は見つからなかった
- X^0 粒子の寿命と組成に対する制限を導いた
 - relic abundance $n_X/n_b \sim 10^{-8} \rightarrow \tau_X \lesssim 200\text{s}$

一番緊急な課題: ${}^9\text{Be}$ 問題

Pospelov と Jedamzik から要請

「Catalyzed BBNの中で、今最も重要で急ぐ課題。

早く精密計算をして欲しい」



⁹Be 問題

観測量 ${}^9\text{Be} / \text{H} \lesssim 2.1 \times 10^{-13}$

Pospelov の第3論文

M. Pospelov, hep-ph/0712.0647 (2008年7月)

M. pospelov, et al., hep-ph/0807.4287 ---- 本論文 30 ページ

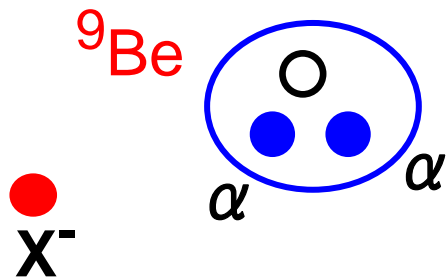
Constraints on Supersymmetric Models from Catalytic Primordial Nucleosynthesis of Beryllium

⁶Li問題、⁷Li+⁷Be問題よりは、むしろ、⁹Be問題の方が、
スタウの寿命,abundanceを決めるのに より適している

「⁶Li, ⁷Li のような、宇宙線による生成、
星の中での生成の可能性」が無い

非常に、強い調子で主張している。

以前の論文と違って、この本論文では、X=スタウと明言

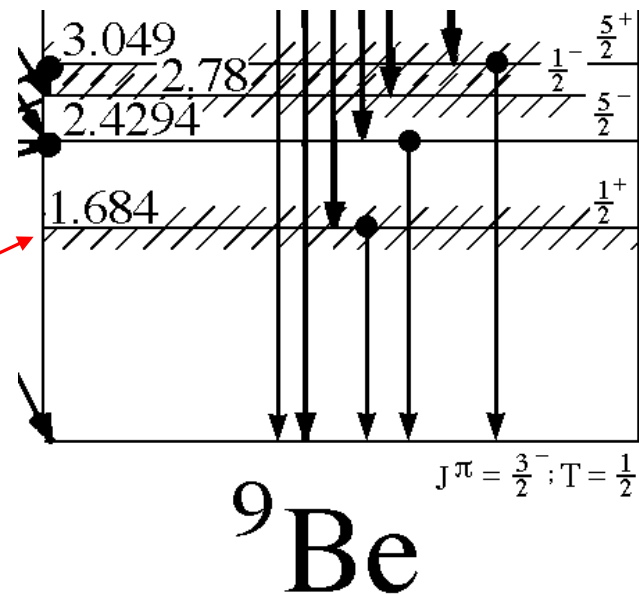


4体問題:
実行中(肥山)

1つのネック

${}^9\text{Be}$ の $1/2^+$ 共鳴状態
エネルギーの

実験値が2通りある



Sumiyoshi et al. (2002)	1.735 ± 0.003 MeV	
TUNL(2004)	1.684 ± 0.007 MeV	
(G. Kuechler et al. 1987)		

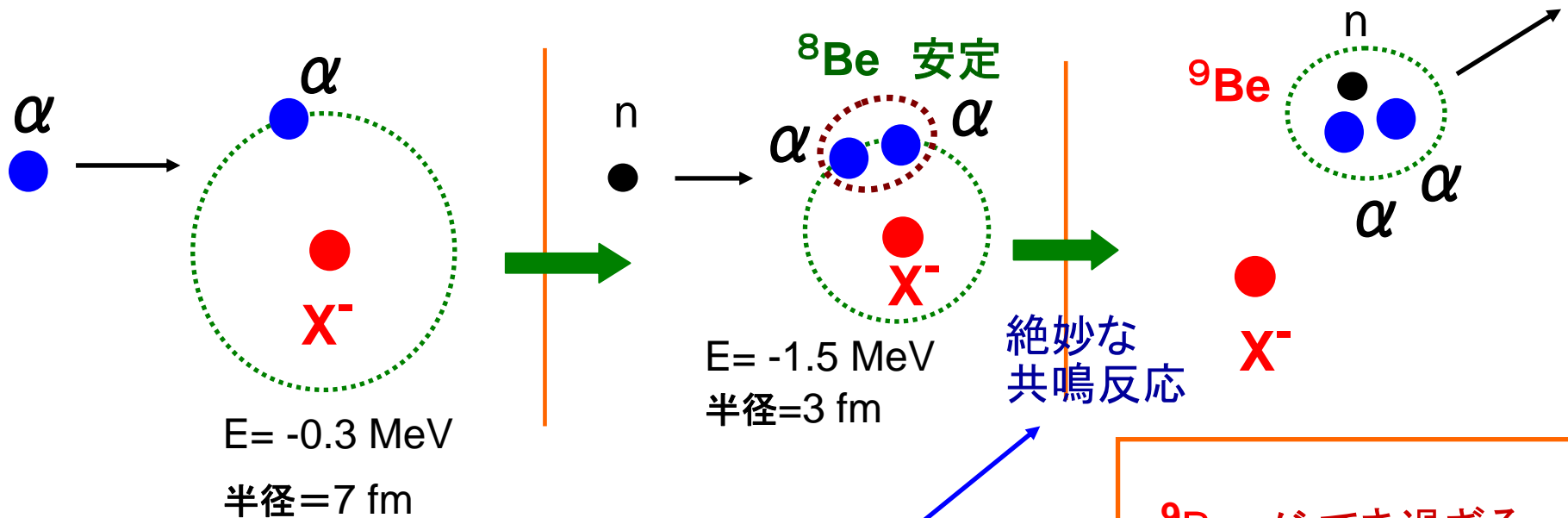
差 50 keV

3) ${}^9\text{Be}$ 問題 観測量 ${}^9\text{Be} / \text{H} \lesssim 2.1 \times 10^{-13}$

M. Pospelov et al. (2008)

スタンダード ビッグバン : ${}^8\text{Be}$ がすぐ α 崩壊する ($\sim 10^{-12}$ 秒)。

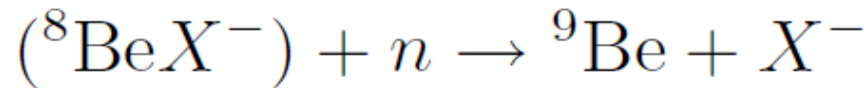
X^- 触媒ビッグバン反応 :



本当か？

${}^9\text{Be}$ ができ過ぎる
↓
 X^- に制限を付ける

Pospelov のトリック

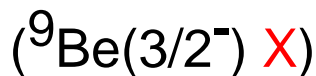
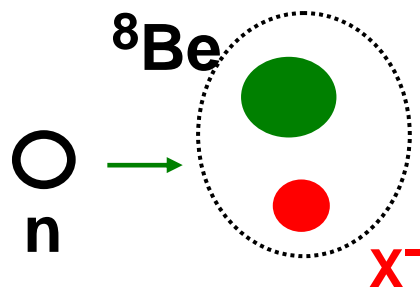
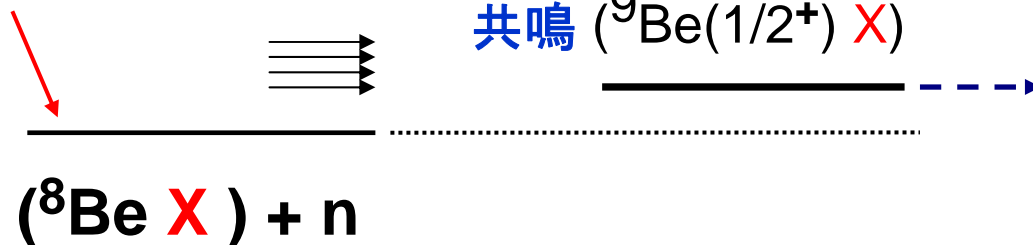


共鳴反応

荷電半径が小さいほど、スタウとのatomic stateのエネルギーは深くなる。

${}^8\text{Be}$ の荷電半径を意識的(?)に小さくしている(2.50 fm)。

下げ過ぎ！



Pospelov の第3論文

M. Pospelov, hep-ph/0712.0647 (2008年7月)

M. pospelov, et al., hep-ph/0807.4287 ---- 本論文 30 ページ

J. Cosmol. Astropart. Phys. **11** (2008), 026,

Constraints on Supersymmetric Models from Catalytic Primordial Nucleosynthesis of Beryllium

印刷版

Note added – After the submission of this paper, a dedicated nuclear physics study of some CBBN reactions has appeared, Ref. [75]. It supports the conclusion of this paper about the large rate for the charge exchange reactions that remove (pX^-). At the same time, this work finds non-negligible shifts, $O(100 \text{ keV})$, of the resonant energy levels employed in the ${}^9\text{Be}$ production chain. This may affect the overall efficiency of ${}^9\text{Be}$ production, and further investigations of the nuclear rates are needed.

↑
我々の論文への言及

Gravitino Dark Matter and the Cosmic Lithium Abundances

Sean Bailly, Karsten Jedamzik, Gilbert Moulaka

[arXiv: 0812.0788 \[hep-ph\]](#)

TABLE III: Potential for SUSY with gravitino LSPs to resolve the ${}^7\text{Li}$ problem, account for ${}^6\text{Li}$, produce ${}^9\text{Be}$, account completely for the dark matter due to non-thermal decay production, and be detectable at the LHC.

Gravitino	NLSP	${}^7\text{Li}$	${}^6\text{Li}$	${}^9\text{Be}$	$\Omega_{\text{DM}}h^2$	LHC
light	stau	X	✓	✓ ?	X	✓
	neutralino	✓	X	X	X	✓
heavy	stau	✓	✓	✓ ?	✓	X
	neutralino	X	X	X	X	✓



Thank you