

「元素誕生のからくり」

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

宇宙で

原子核が組み変わって(反応して)様々な元素が..

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。実は、原子の中心にある極く小さな原子核が、大きな宇宙のスケールの中で元素誕生の鍵を握っている。太陽などの恒星が輝く仕組み、星の一生、宇宙の進化にも関係する元素の合成と原子核について理解を深める。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してゆく。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)の見学会や、適当なものがあれば講演会聴講を予定している。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前提としている。

元素	--- 概念(種類 - 水素、鉄、ウラン...)
原子	--- 実体(個、"ウラン <u>の</u> 原子")
原子核	

論文(とは何だろう)の話もするかな。

物理学の基本にも触れます。

量子とは？ 不確定性... パウリ原理
パリティってワカン

トピックス - ニホニウム(113番元素)、重力波

太陽はどこ？

別の銀河、
そして遠くには
もっとたくさんの銀河

アンドロメダ銀河

230万光年

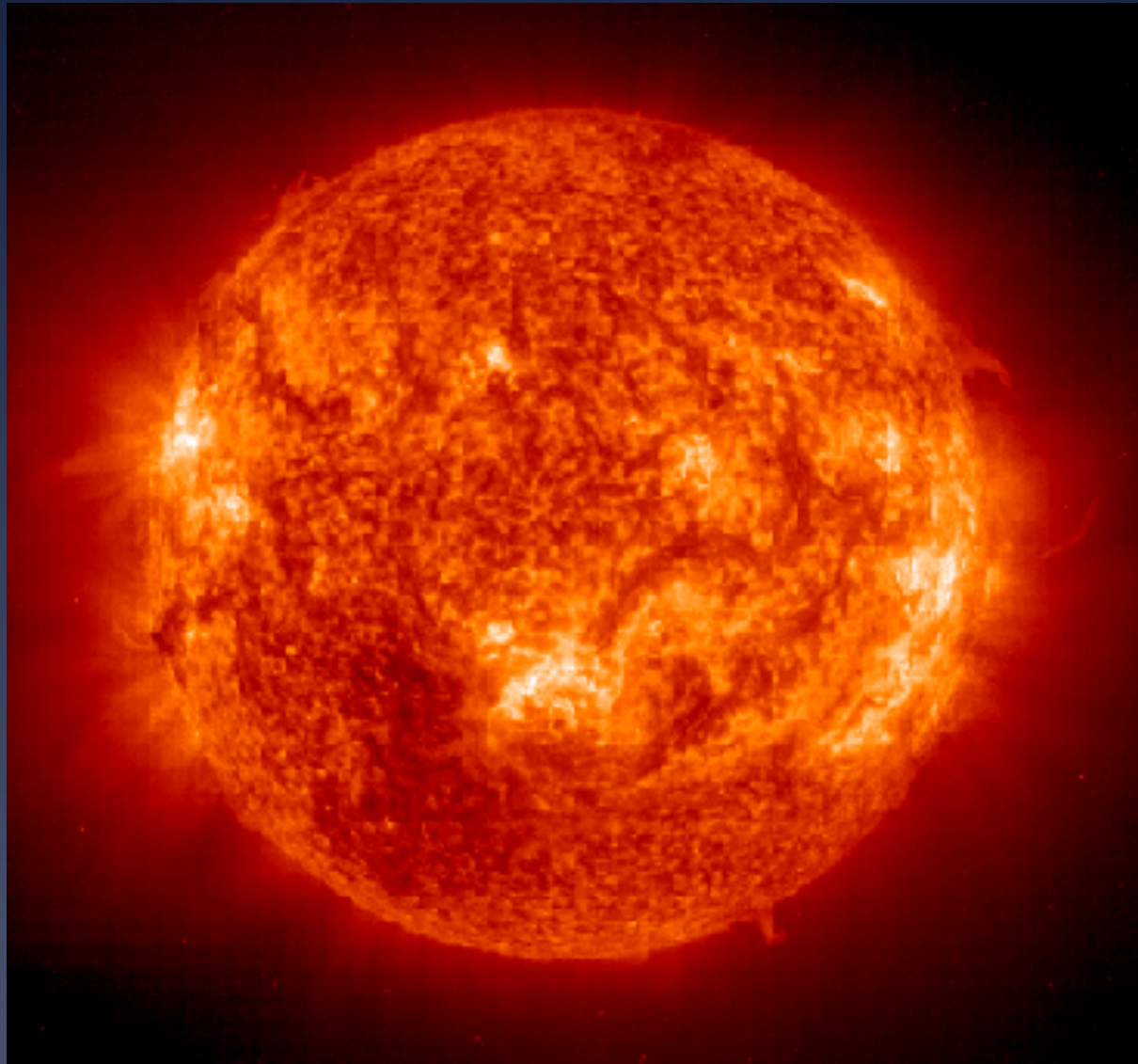
たくさんの星の集まり
銀河系

約10万光年

たくさんの星雲の連なり
オリオン大星雲もそのひとつ

太陽系のあるところ

太陽 その3 ー太陽ニュートリノ問題



太陽は

ニュートリノ*を発生する

太陽ニュートリノは「振動」する？

その一生

生まれたのは...

数十億年後には...

* ノーベル賞の常連？

太陽ニュートリノ Davis 2002

超新星ニュートリノ - 小柴 2002

大気ニュートリノ - 梶田 2015

2019年ノーベル賞は(ニュートリノではなく)

宇宙論(ジェームズ・ピーブルズ) -- 授業でやった宇宙の歴史などを含む

系外惑星(ミシェル・マイヨールとディディエ・ケロー)

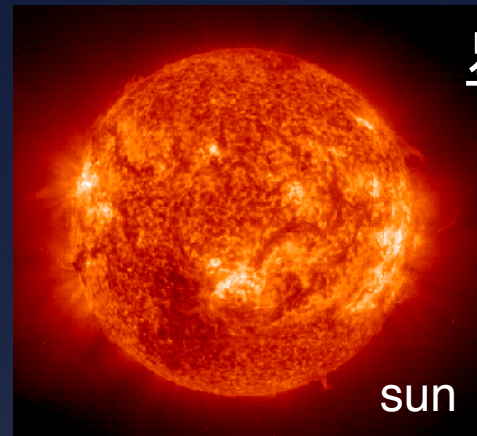
太陽は

ニュートリノを発生する

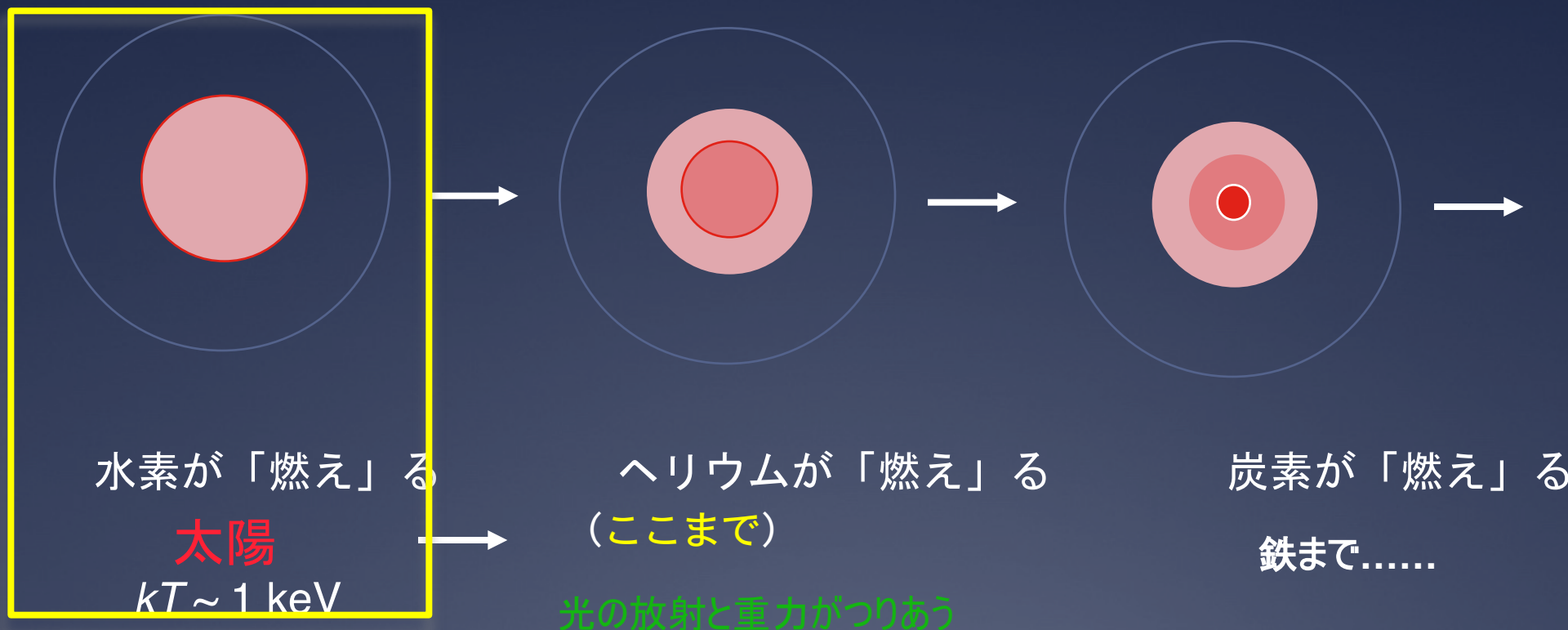
太陽ニュートリノは「振動」する？

星は荷電粒子(原子核)の発熱反応によって光る.

重力による断熱圧縮により高温ガス中の核反応が点火

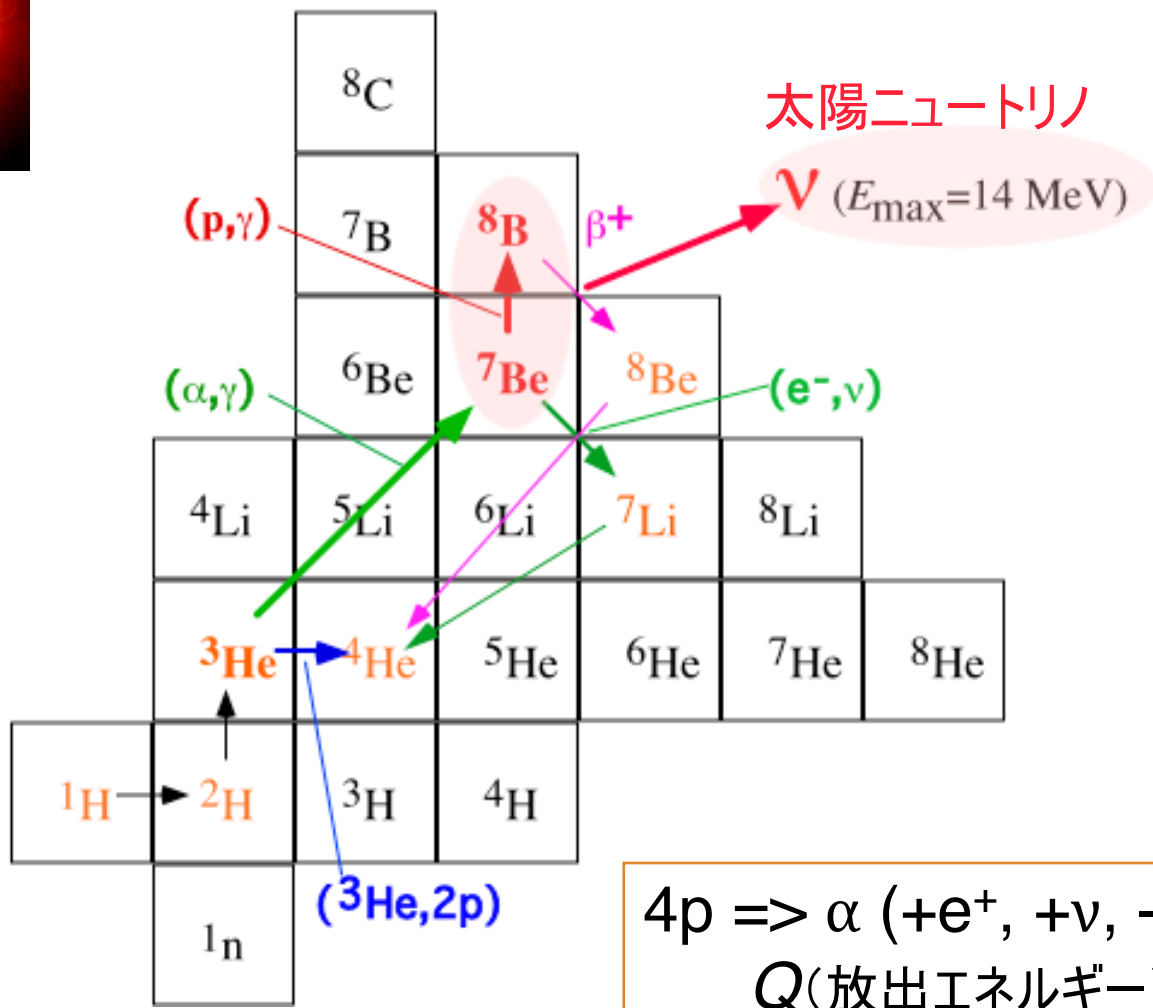
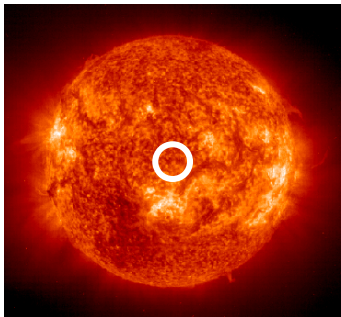


主系列星の進化



Stellar burning itself is nuclear process.

太陽の中心では陽子が燃えてヘリウムに、そしてニュートリノ発生 「p-pチェーン」



$4p \Rightarrow \alpha (+e^+, +\nu, -e^-)$
 $Q(\text{放出エネルギー}) \sim 26 \text{ MeV}$

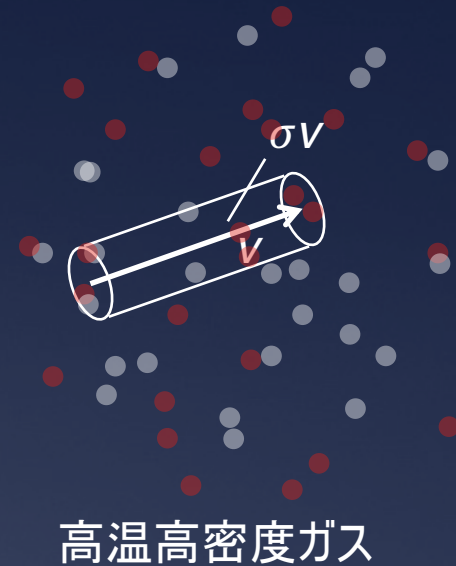
反応率 ← 断面積をマクスウェル分布で平均する

単位体積、単位時間あたりに起きる反応の数

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

反応率

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



電荷を持つ粒子同士: クーロン反発力があるが、トンネル効果で反応

例

$$T = 1.5 \times 10^7 \text{ K (太陽)} \rightarrow kT = 1.3 \text{ keV } (E_G = 20 \text{ keV})$$

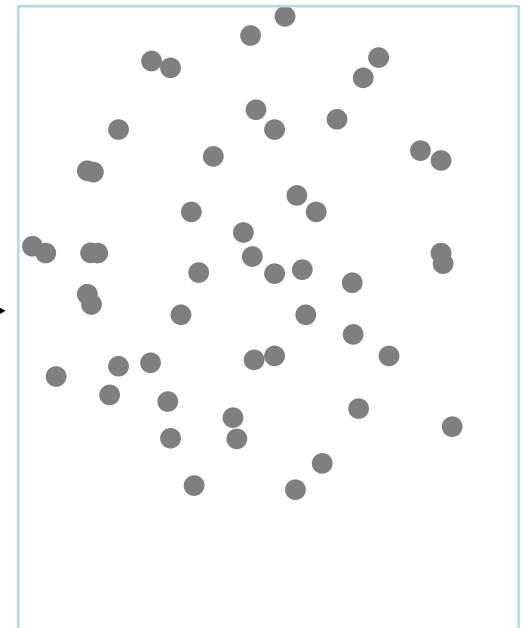
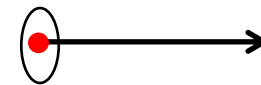
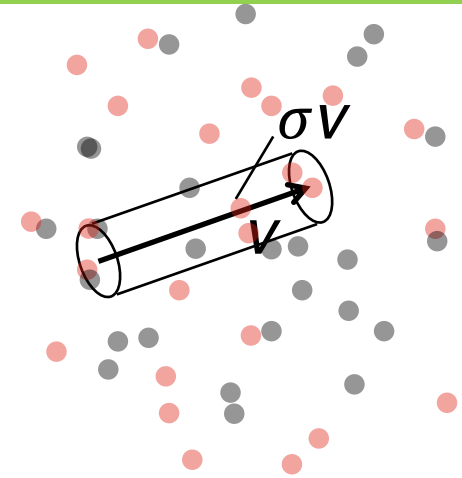
断面積のかわりに以下の「天体物理学的S因子」を使うと、エネルギーにあまりよらない表現になる

$$S = \sigma E \exp[2\pi\eta]$$

$$\eta = e^2 Z_1 Z_2 / \hbar v$$

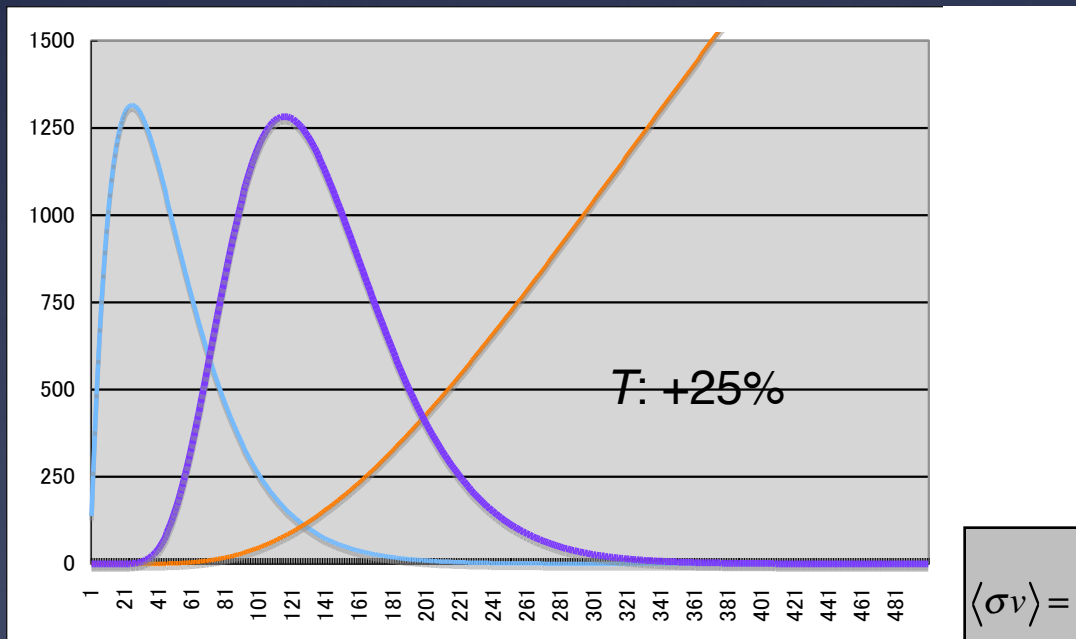
エータ

1. いろいろな状況
星の中のようなガス
「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



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



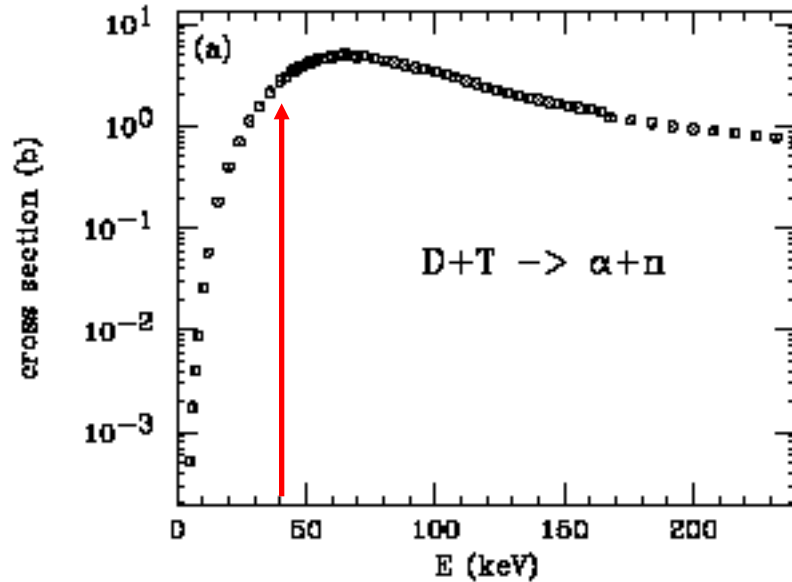
light blue: Maxwell-Boltzmann 分布
orange: 断面積
purple: 両者の積 (積分される関数)



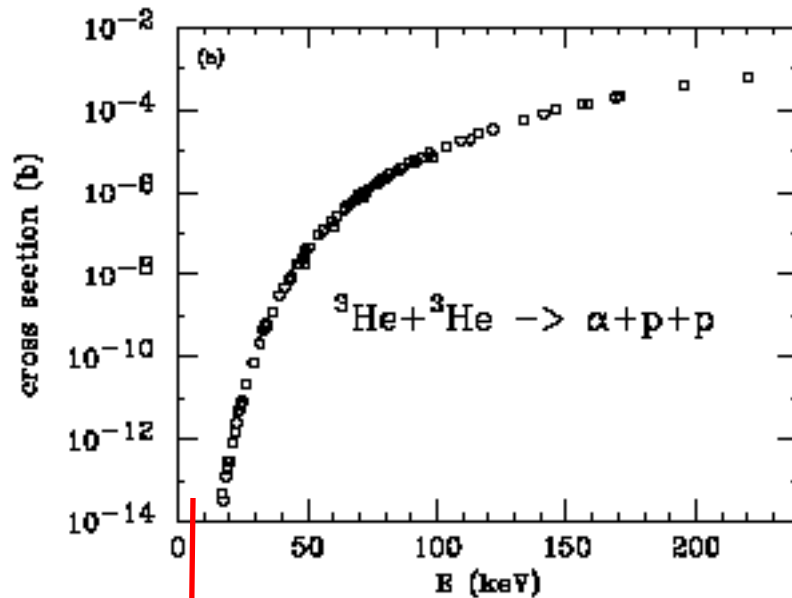
ガモフさん(1904-1968)

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

星の温度では、核反応はクーロン反発力により抑制される。 トンネル効果で
 融合がない場合 ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n}$ (核融合炉)、 ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p} + \text{p}$ (太陽)

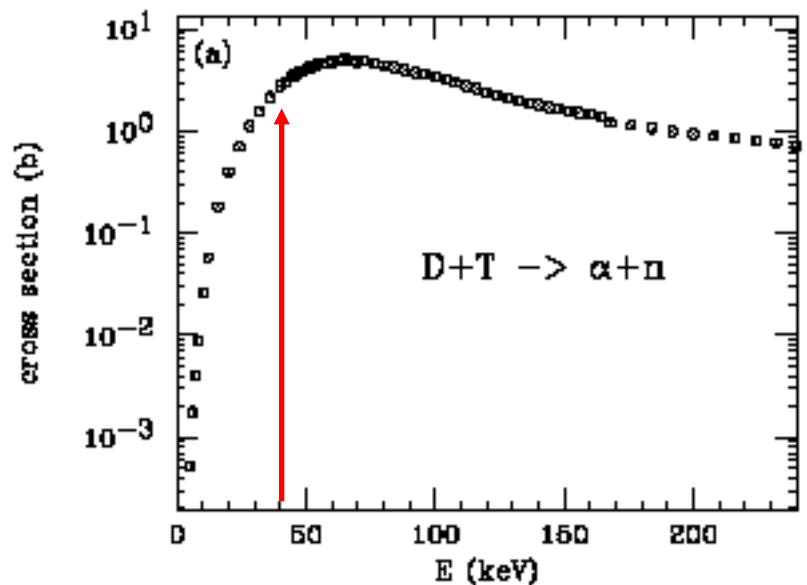


JT60
 5億度
 $kT = 41 \text{ keV}$



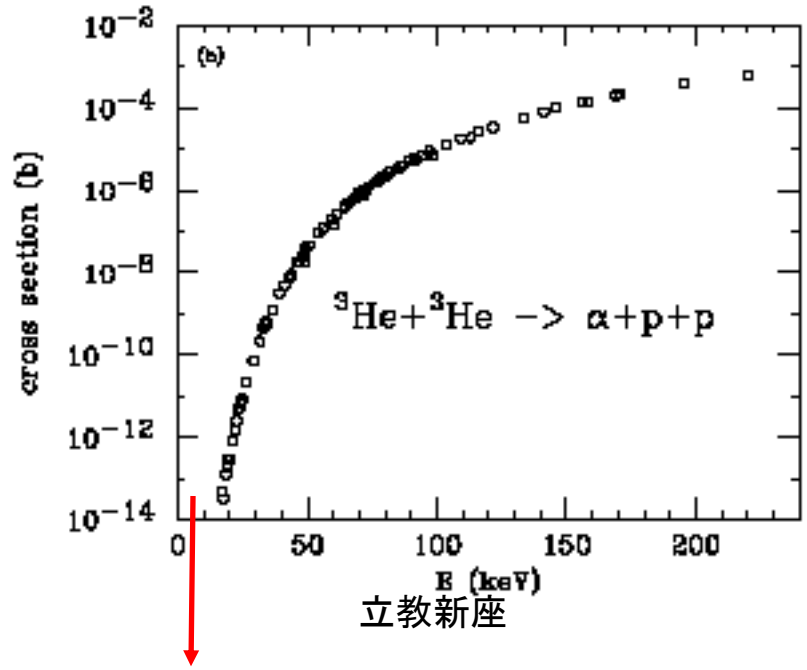
太陽
 1500万度
 $kT = 1.2 \text{ keV}$

核融合炉が想定する
反応では、
断面積は「そこそこ」



JT60
5億度
 $kT=41 \text{ keV}$

星の温度では、
断面積は小さい

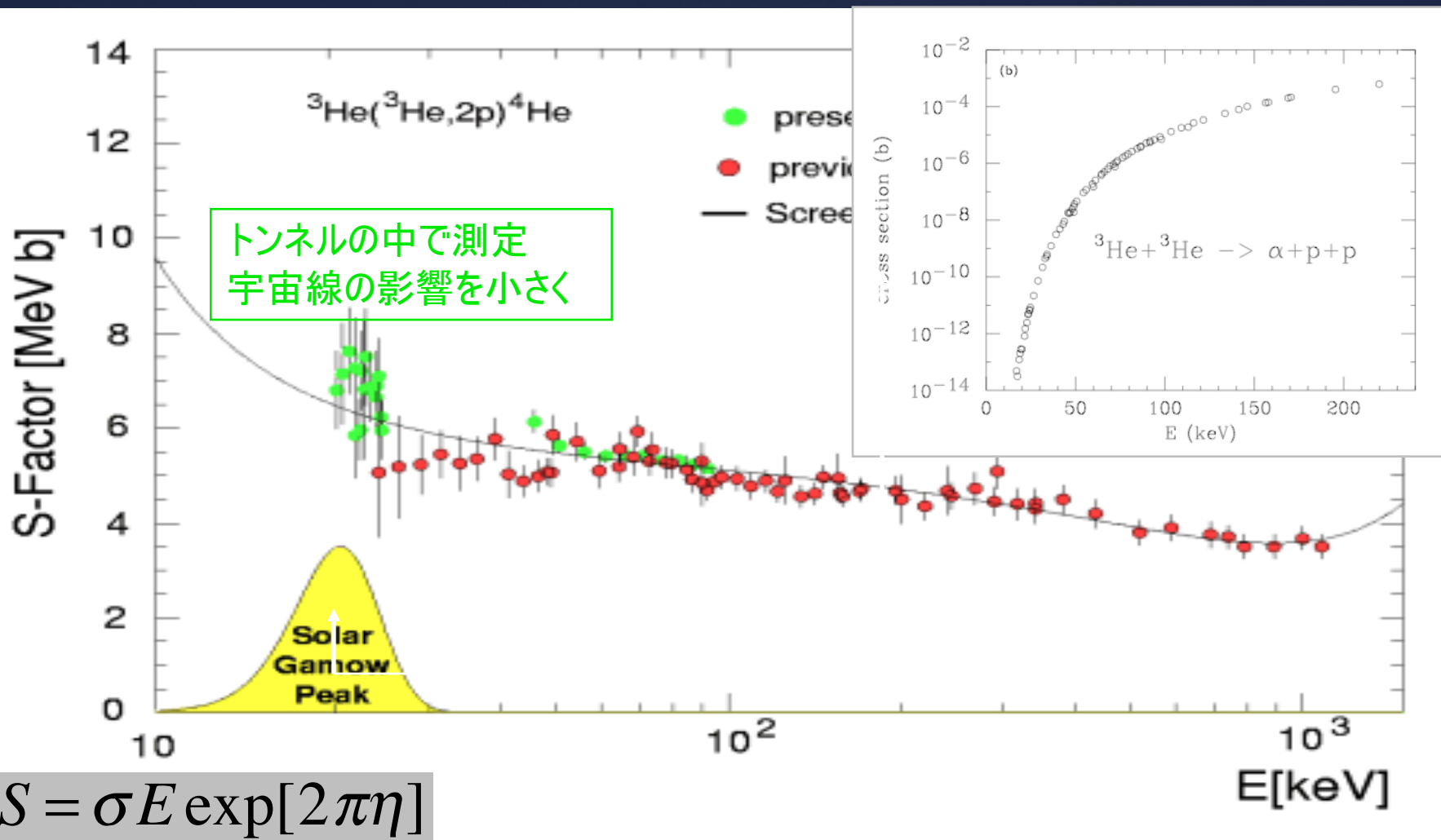


太陽
1500万度
 $kT=1.2 \text{ keV}$

「天体物理学的S因子」を使うとエネルギー依存は「おとなしく」なる

燃焼エネルギーでの
断面積はとても小さい

${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ 反応 (pp chain) の例



トンネルの中で測定
宇宙線の影響を小さく

$$S = \sigma E \exp[2\pi\eta]$$

$$\eta = e^2 Z_1 Z_2 / \hbar v$$

by LUNA collaboration

では、ニュートリノを出す ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$ 反応は？
 ${}^8\text{B}$ は崩壊する $\rightarrow {}^8\text{Be} (\rightarrow 2\alpha) + \nu + e^+$

${}^7\text{Be}$ は不安定(半減期 50日)

太陽ニュートリノの不思議の1つ -- ^8B 問題

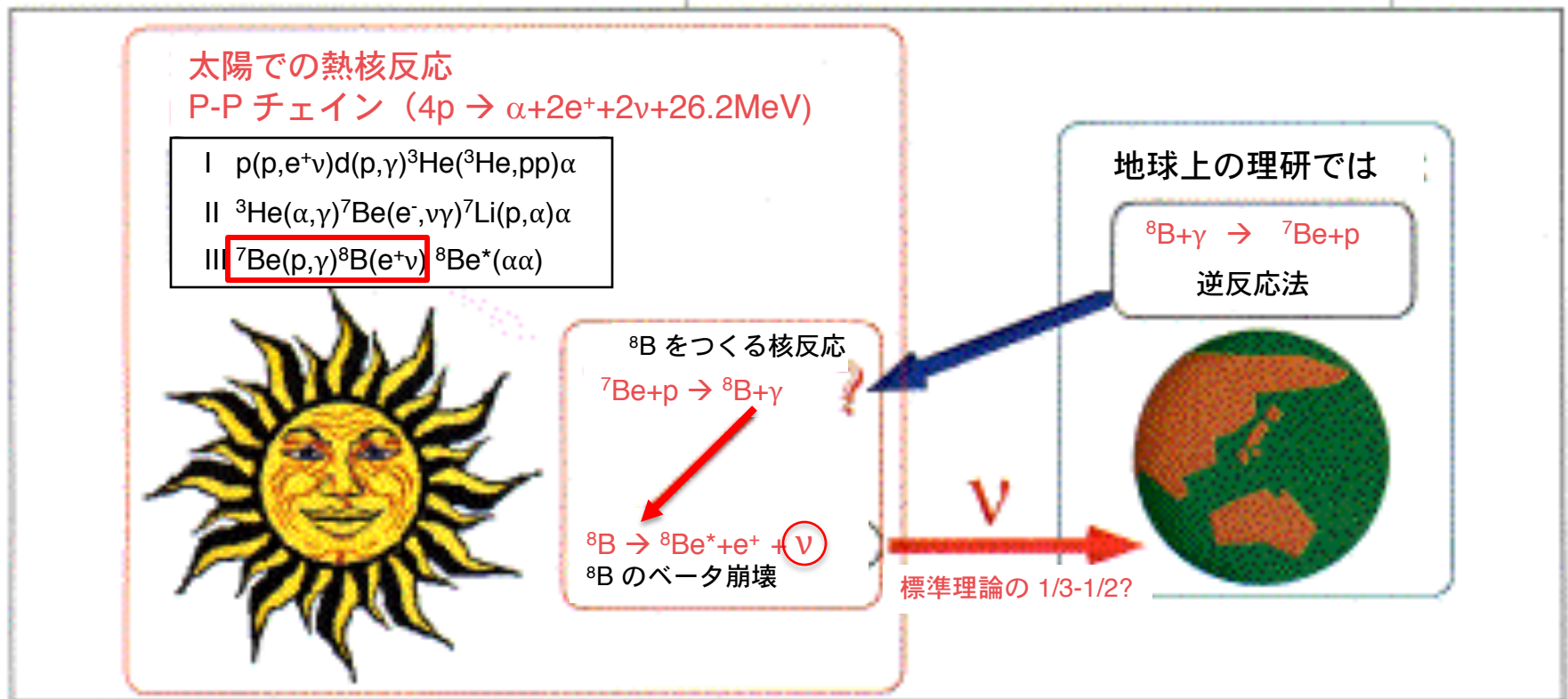
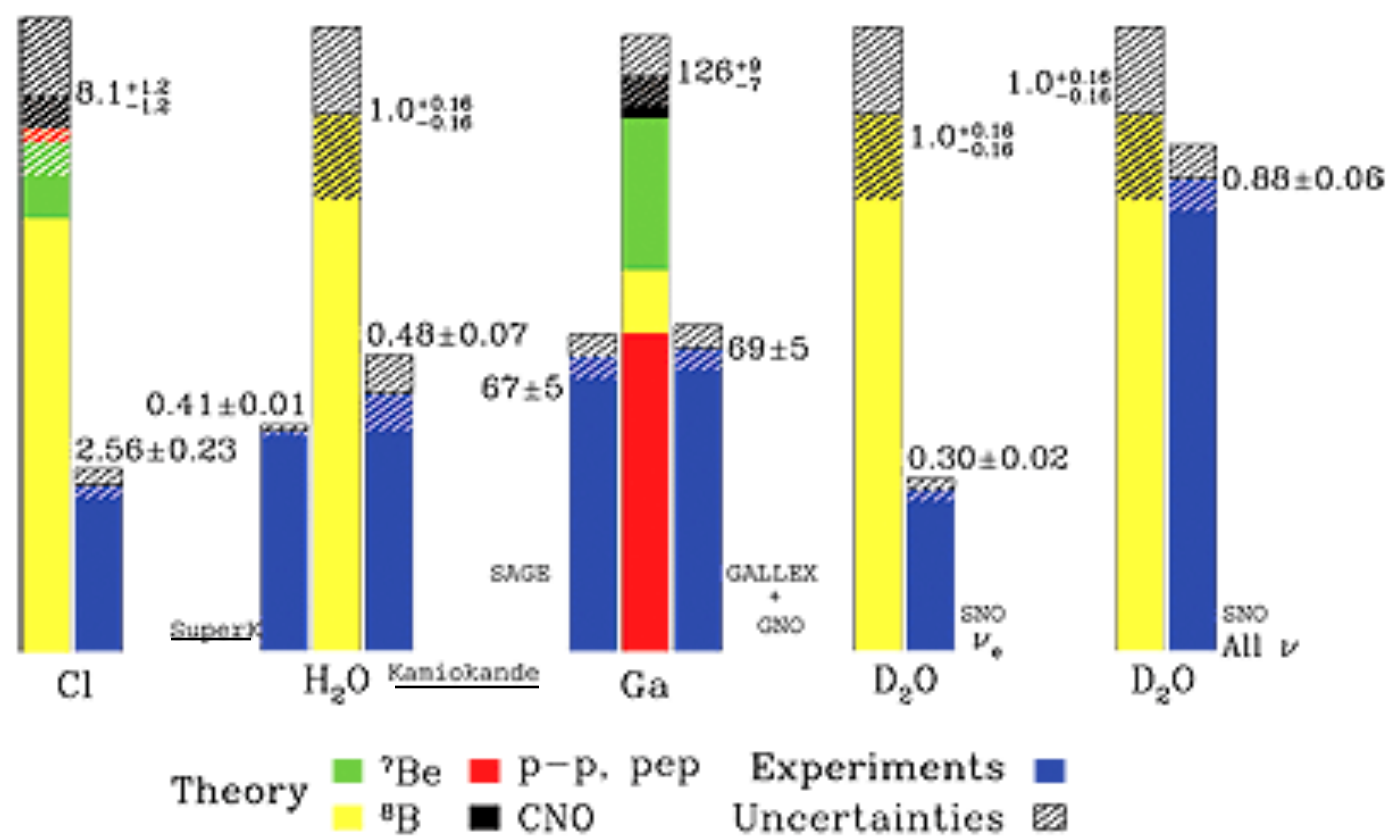


図4 太陽ニュートリノ問題

測って見るとニュートリノ(束)が足りない！

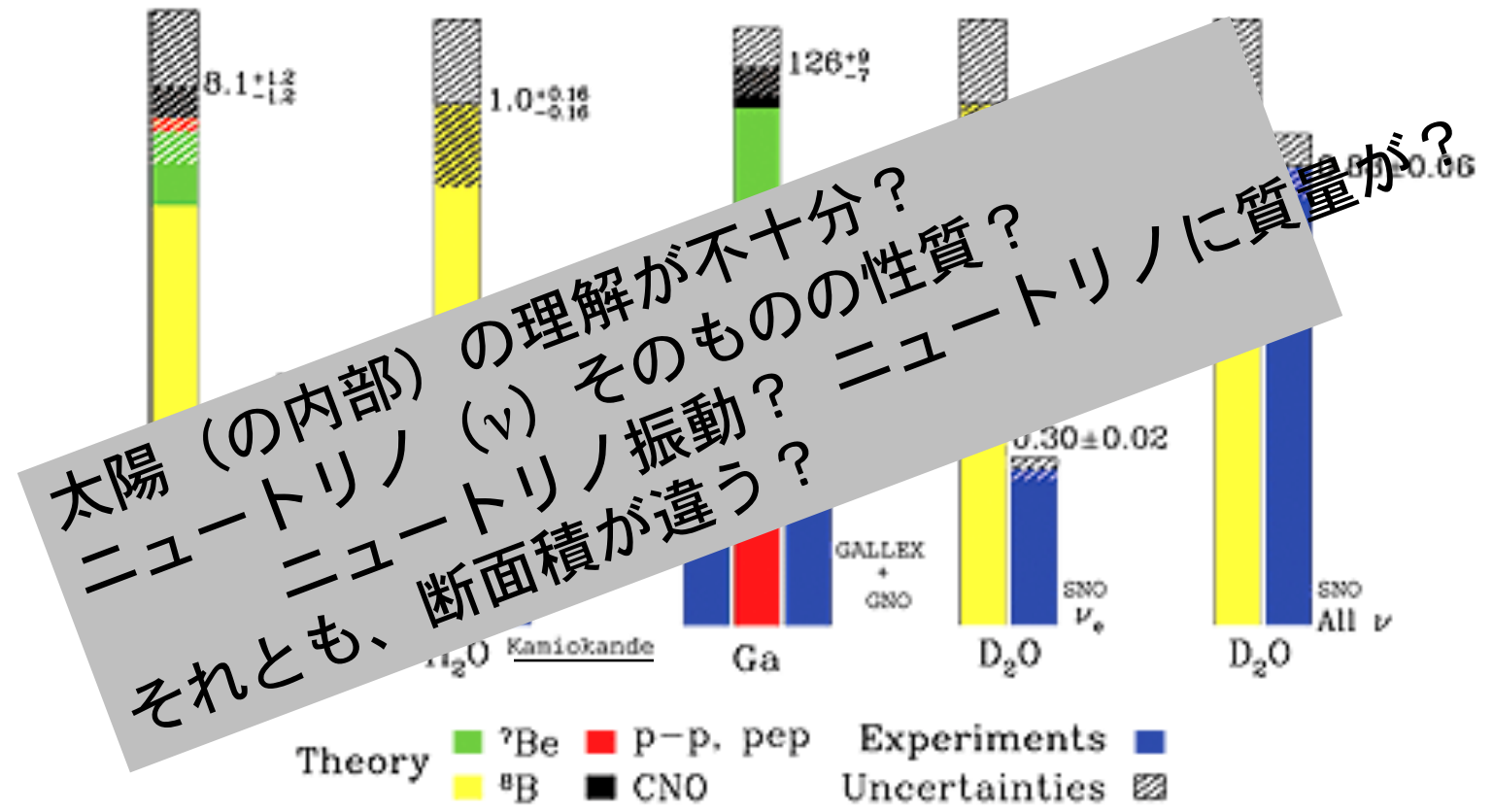
Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Serenelli 2005 [BS05(OP)]



by J.N. Bahcall

測って見るとニュートリノ(束)が足りない！

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Serenelli 2005 [BS05(OP)]



太陽ニュートリノの不思議の1つ -- ^8B 問題

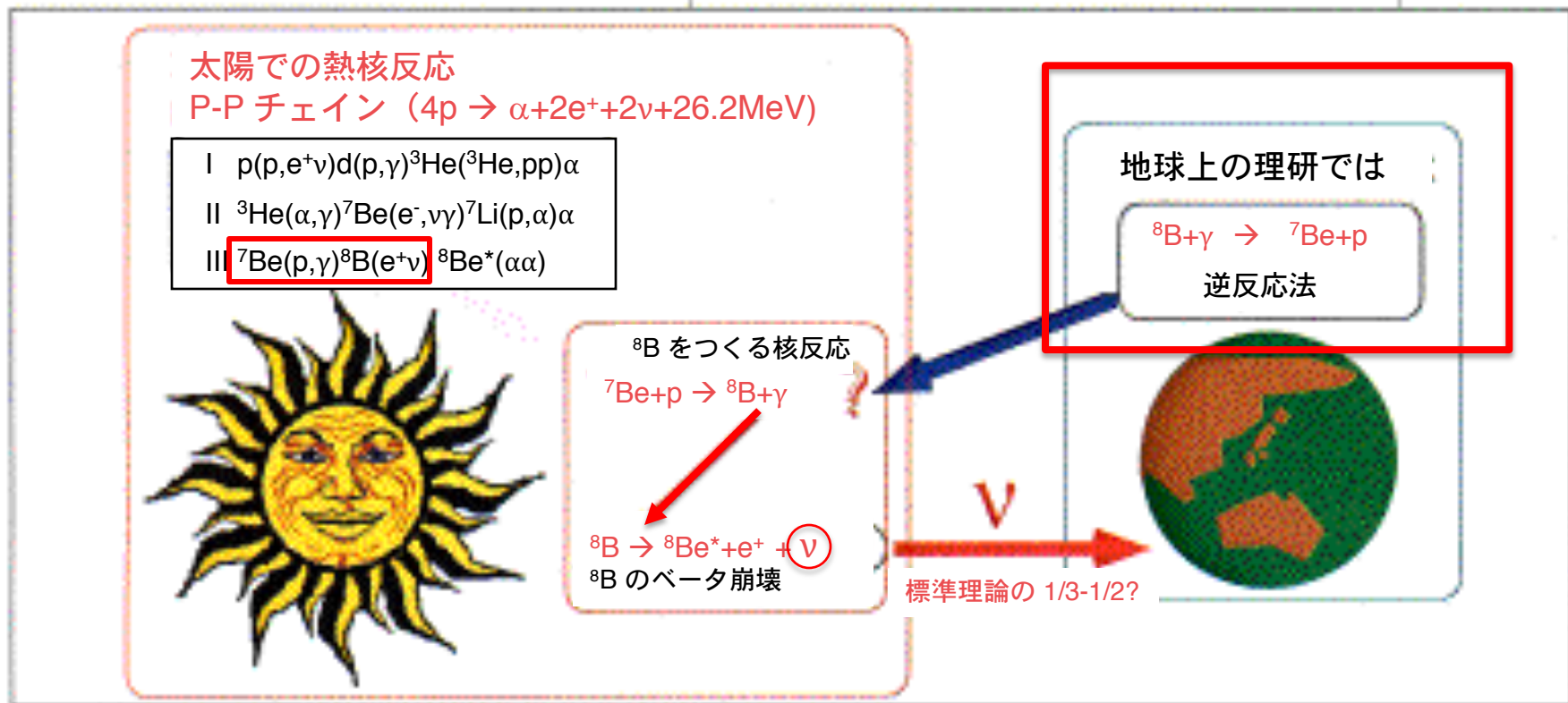


図4 太陽ニュートリノ問題

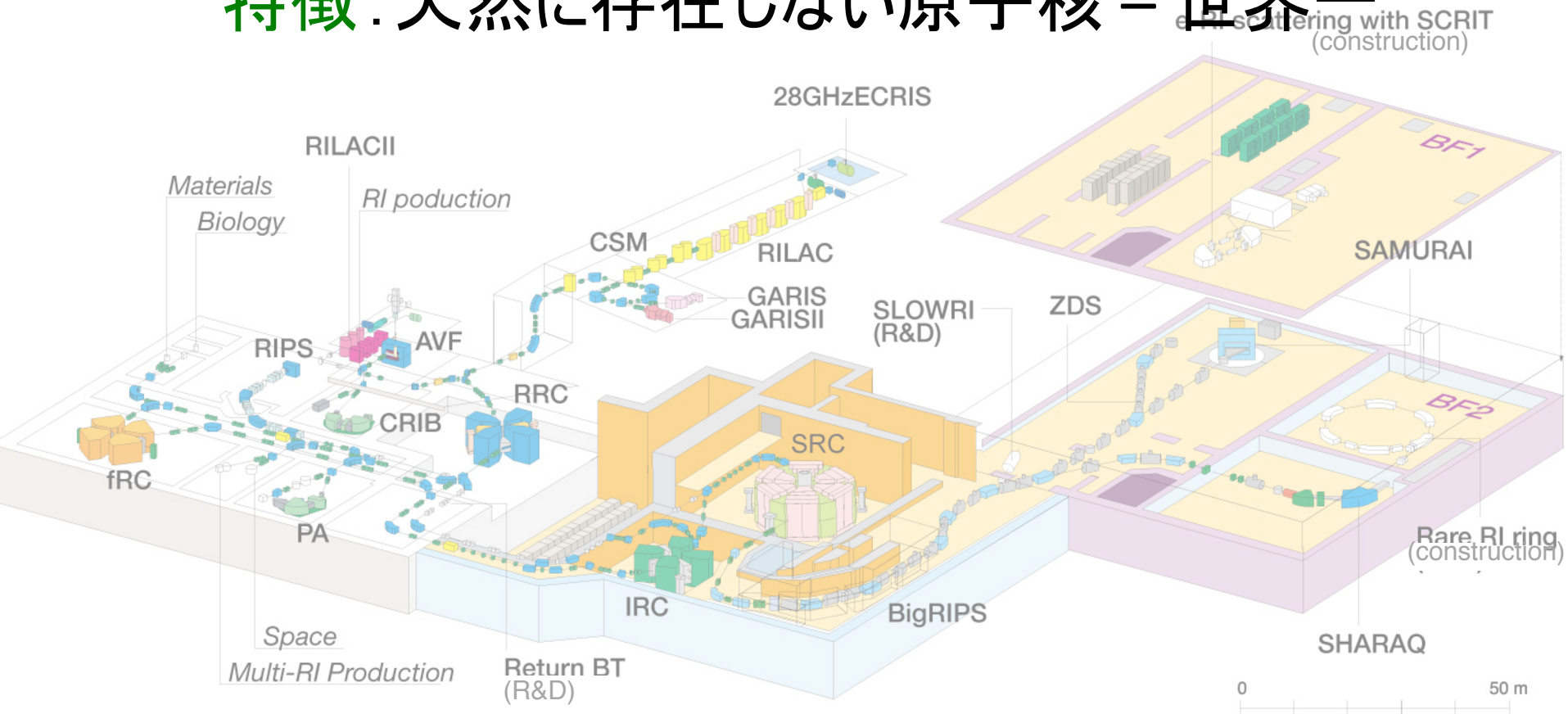
理研RIビームファクトリー

理研 RI ビームファクトリー

原子核、さらに原子核から宇宙を研究

陽子からウランまでを**加速**可能

特徴: 天然に存在しない原子核 – 世界一



理研 RI ビームファクトリー

重イオンビームの加速装置

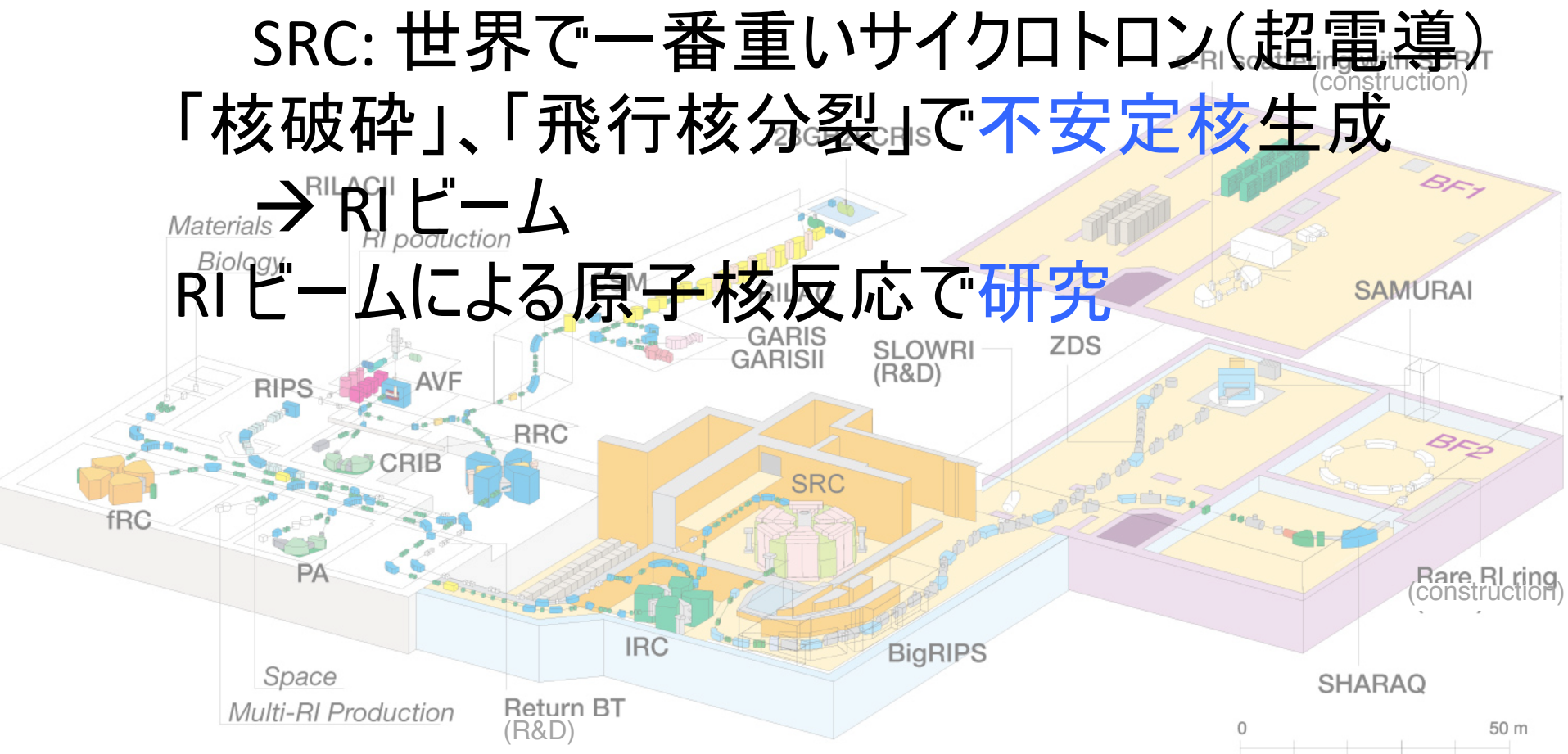
線型加速器、サイクロトロンで**多段加速**

SRC: 世界で一番重いサイクロトロン(超電導)

「核破碎」、「飛行核分裂」で**不安定核生成**

→ RI ビーム

RI ビームによる原子核反応で**研究**



RI ビーム発生

RIBF: 理研 RI ビームファクトリー 世界一の性能

光速の
3割

113 番元素 (ニホニウム) の発見

~5 MeV/nucleon

RARF

RILAC

ECR

CSM

GARIS

DPOL

ECR

AVF

RIPS

RIBF Accel. Bldg.

RIBF Exp. Bldg.

pol. d beams

0 50 m

135 MeV/nucleon
for light nuclei (1986-)



SRC
(8300 t)

の6割

UT

新施設

up to U

2006 年 12 月 : 最初のビーム

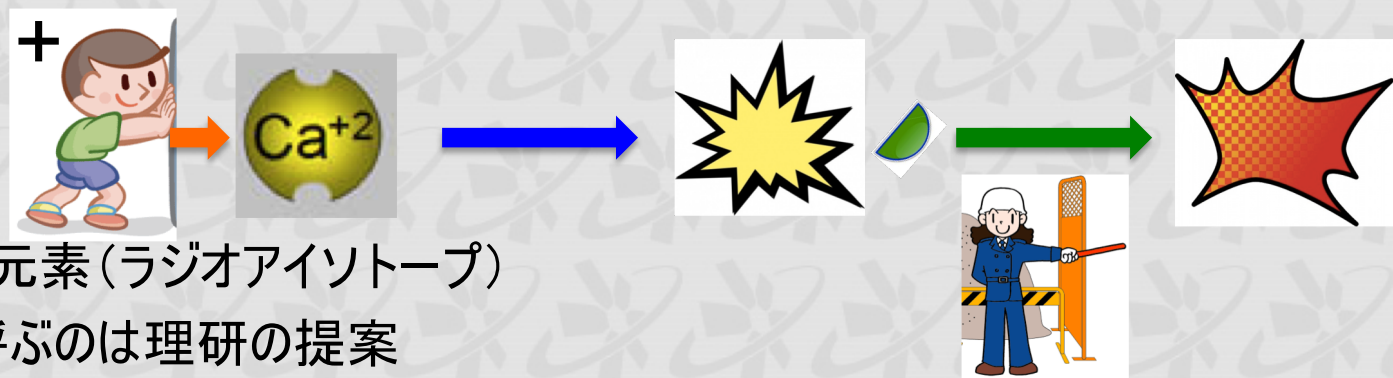
2007 年 : ウランのビームで RI ビーム生成, 新同位元素

2008 年 - : 新同位元素、RI ビームによる反応実験

重イオンと RI ビーム



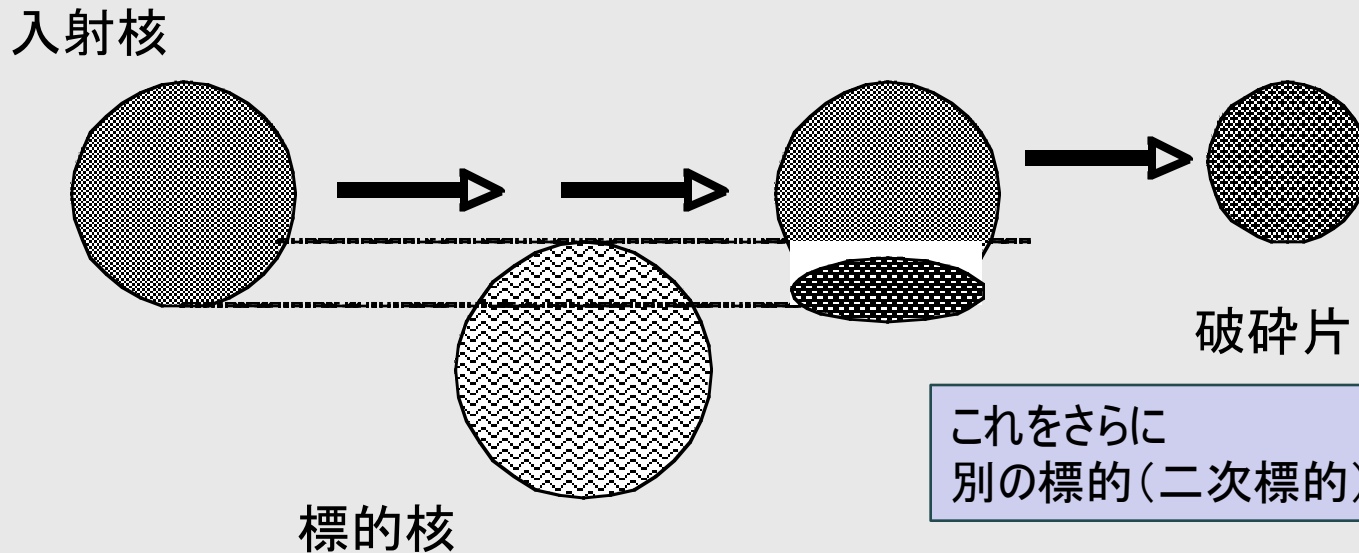
イオンは電気を帯びた原子(とは限らないけど)、中心に原子核
 リチウムから重イオンです
 加速すると「重イオンビーム」、反応させると「重イオン核反応」
 その昔は水素やヘリウム(軽イオン)のビームが常識



RI は放射性同位元素(ラジオアイソトープ)
 「RI ビーム」と呼ぶのは理研の提案
 重イオン反応でできるRI をビームとして使う RIBF

「重イオンを投げて、雪合戦？」

不安定原子核のビーム(RI ビーム)を作る

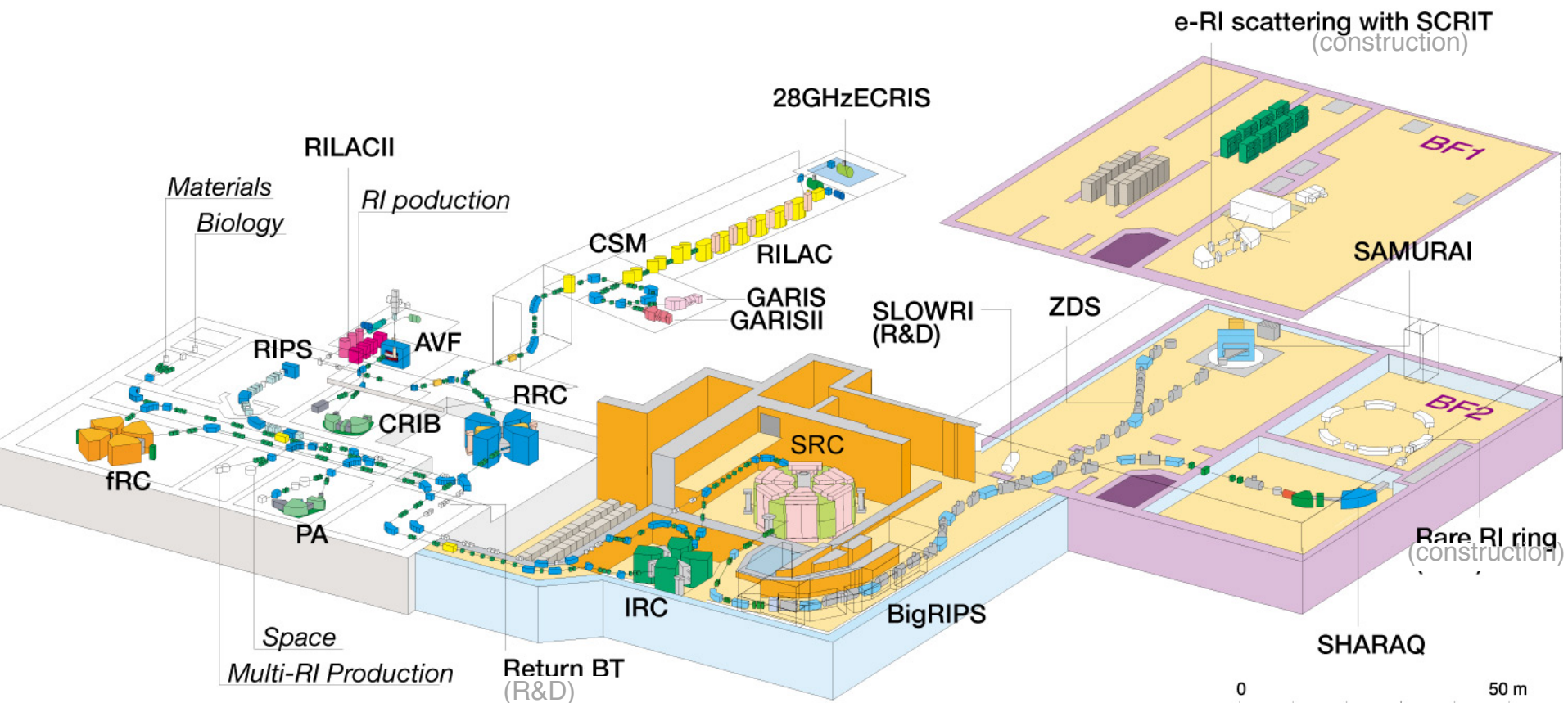


これをさらに別の標的(二次標的)と衝突させる

光速の 20-70% の入射核 => ほぼ同じ速度、同じ方向の破碎片
様々な原子核を確率的に生成 => 選別 => 不安定核の二次ビーム

高速、大強度のイオン束(ビーム)が必要
→ 理研の重イオン加速器(最新はRI ビームファクトリー)

理研 RI ビームファクトリー



<http://www.rarf.riken.go.jp/enjoy/RIBFbeam.html>

では、ニュートリノを出す ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$ 反応は？

${}^8\text{B}$ は崩壊する $\rightarrow {}^8\text{Be} (\rightarrow 2\alpha) + \nu + e^+$

${}^7\text{Be}$ は不安定(半減期 50日) ーちょっと実験が難しい

逆反応 (${}^8\text{B} + \gamma \rightarrow {}^7\text{Be} + p$)をやってみたら？

${}^8\text{B}$ の不安定核(RI)ビーム

もう一工夫あって、 γ を「仮想光子」で供給

理研のRIビームで1994年に最初の論文(本林他)

グラフ描画実習 – 正規分布