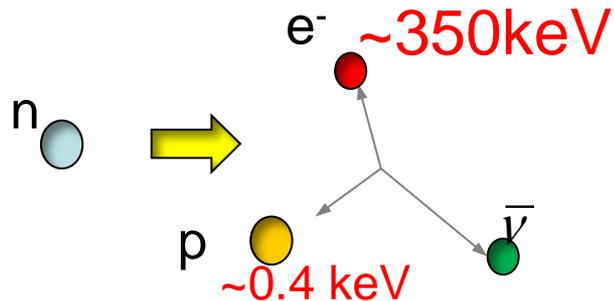


中性子寿命の精密測定と ビッグバン元素合成

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所
特別准教授
三島 賢二

On behalf of J-PARC neutron lifetime collaboration

中性子の β 崩壊



中性子寿命 :

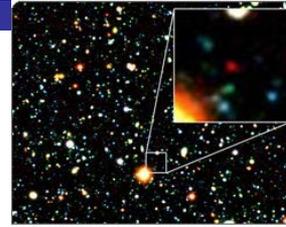
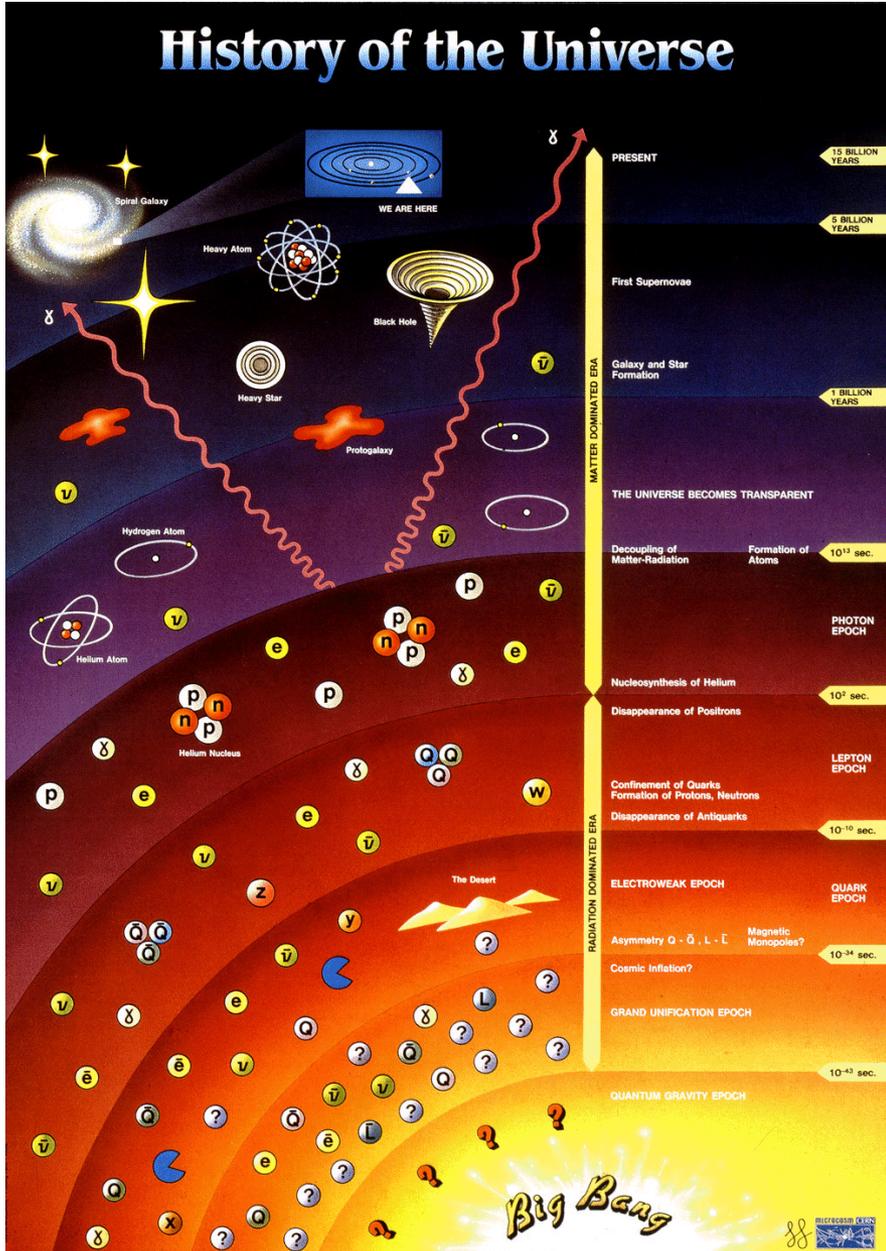
$$\tau_n = 880.1 \pm 1.1 \quad (\text{PDG2012})$$

中性子は880秒で陽子、電子、反ニュートリノに崩壊する。
これは最も単純な原子核の β 崩壊である。

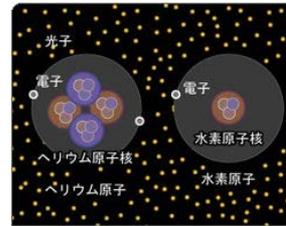
中性子崩壊の重要性として以下の物理があげられる

- **Big Bang Nucleosynthesis** ←ビッグバン後の軽元素合成
- CKM unitarity
- reactor neutrino anomaly
- solar neutrino
- proton spin
- Goldberger-Treiman/Muon capture
- Bjorken sum rule
- Lattice calculation benchmark

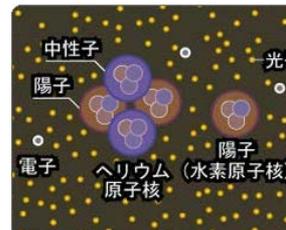
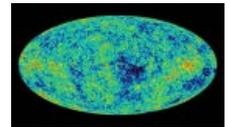
ビッグバンと宇宙の進化



星の形成
(8億年)

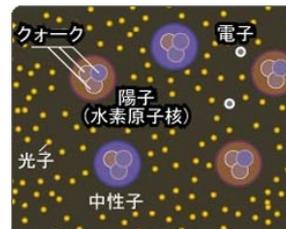


原子の形成
(38万年)

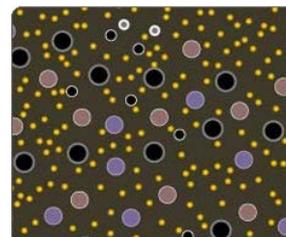


原子核の誕生
(200秒)

中性子寿命測定



核子の生成
($\sim 10\mu$ 秒)



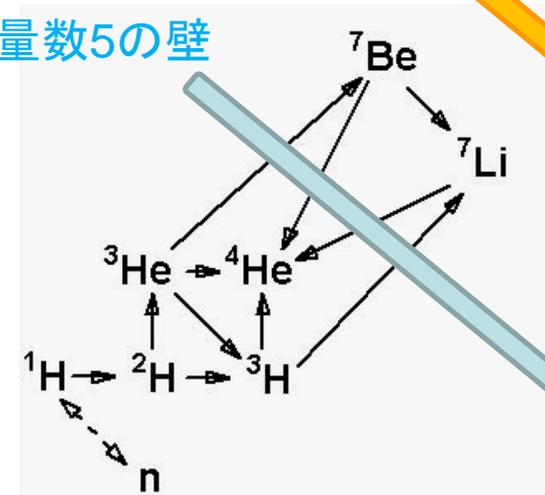
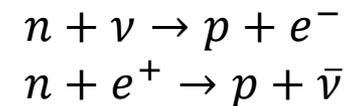
クォークグルーオンプラズマ

ビッグバン元素合成

Big Bang Nucleosynthesis

ビッグバン元素合成(BBN)

- ビッグバン後の10usで陽子と中性子が形成される。
 - 陽子と中性子は同じ数。
- $T \sim 1\text{MeV}$ (1秒)
 - 温度が下がってくると中性子が減ってくる。
 - 1秒後($T \sim 1\text{MeV}$)あたりで平衡からずれる (Freeze out)
 - $Q(n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}) = 1.293\text{MeV}$ 質量数8の壁
 - $\frac{n}{p} = \exp\left(-\frac{Q}{T_f}\right) \sim 1/6$ 中性子寿命 質量数5の壁
- $T \sim 0.1\text{MeV}$ (3分)
 - $p + n \rightarrow D + \gamma$ ($Q = 2.22\text{ MeV}$)
- $T < 0.1\text{ MeV}$
 - ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$ が合成される。



質量数7までの元素を3~60分で合成する。

陽子と中性子の量がわかれば反応断面積から計算できる。

ビッグバン元素合成(BBN)

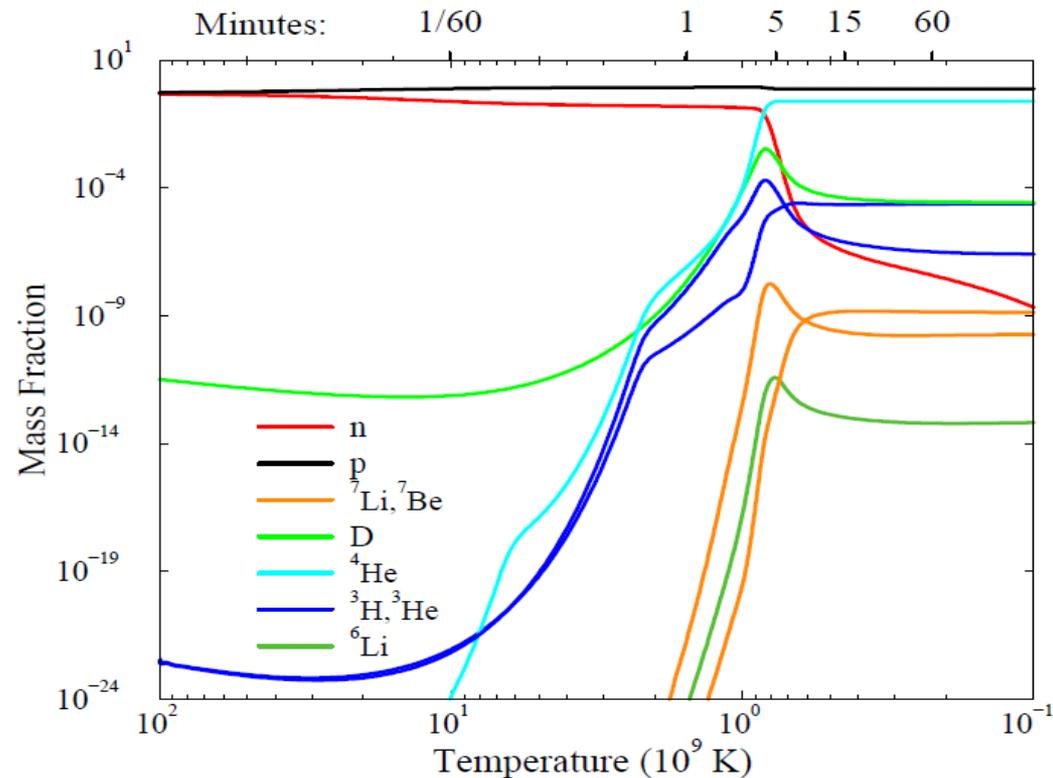
初期条件がわかればその後の元素合成が計算可能。

インプットパラメーターは

- バリオン数密度(CMB測定から)
- 中性子寿命
- 核反応断面積

標準BBN理論

- isotropic and homogeneous matter distribution
- general relativity
- standard theory of EM+Weak
- neutrinos are light and stable
- number of neutrino species=3

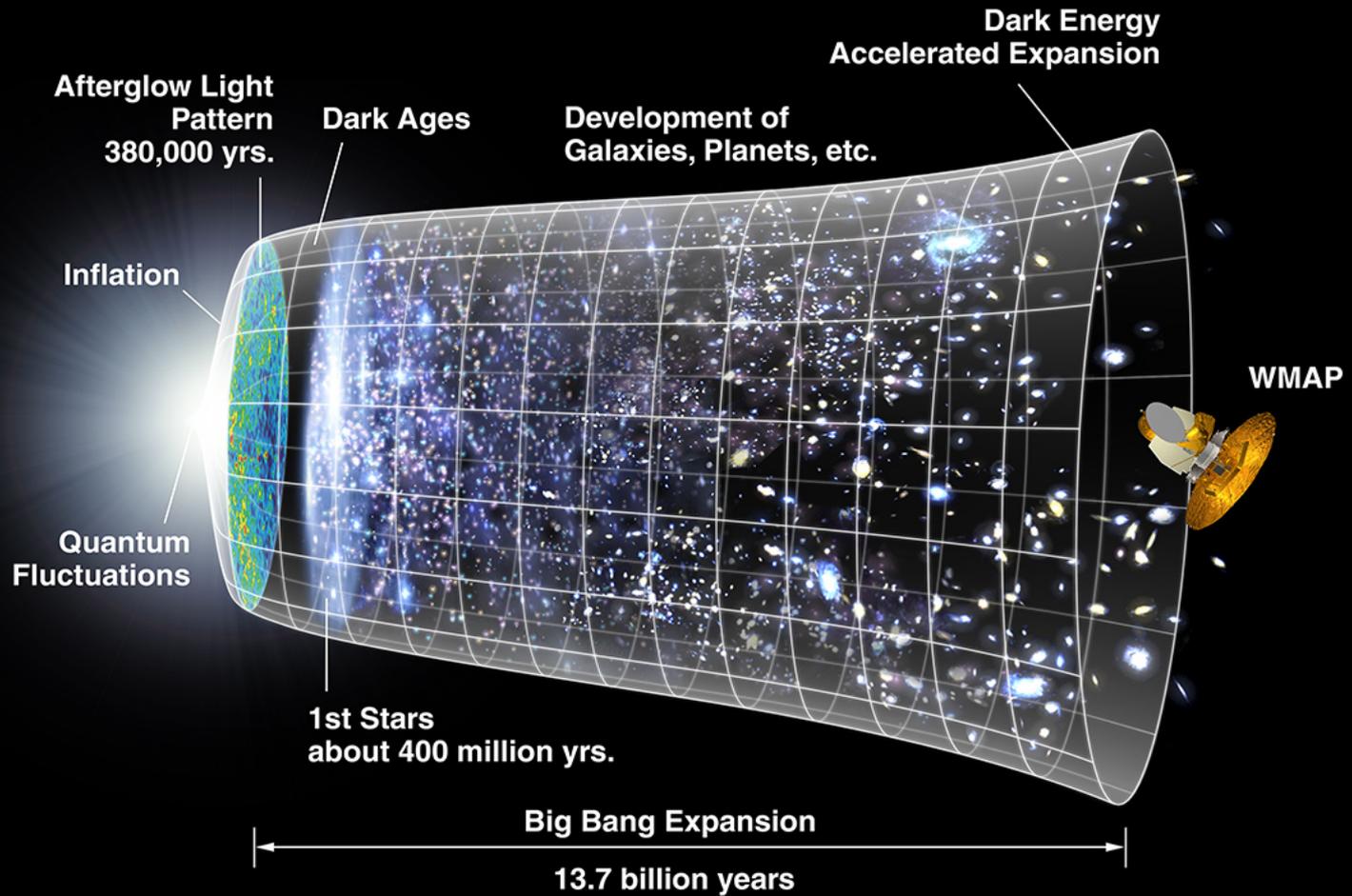


初期宇宙の観測と良い精度で比較すれば、標準BBNの検証が可能になる。

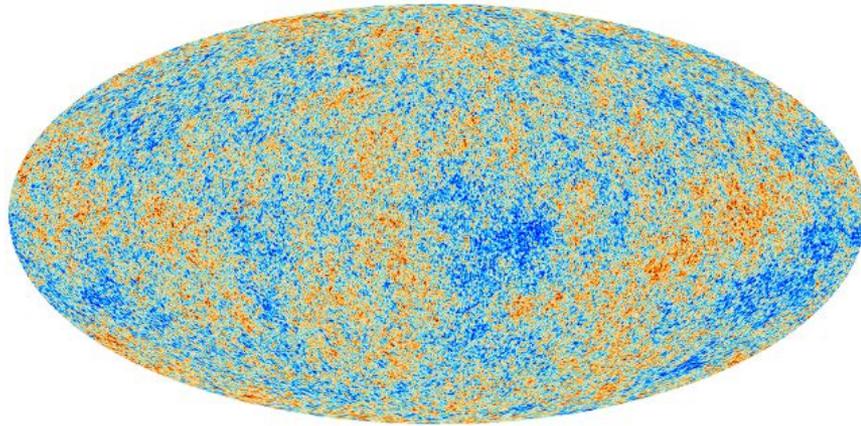
宇宙背景放射

Cosmic Microwave Background

宇宙の腫れあがりと宇宙背景放射(CMB)の測定 COBE, WMAP, and Plank



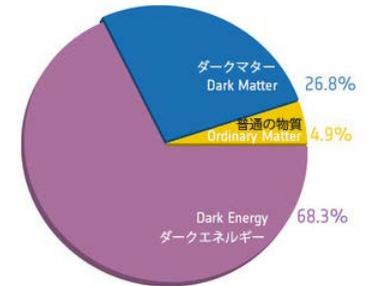
2.7K宇宙背景放射からわかること



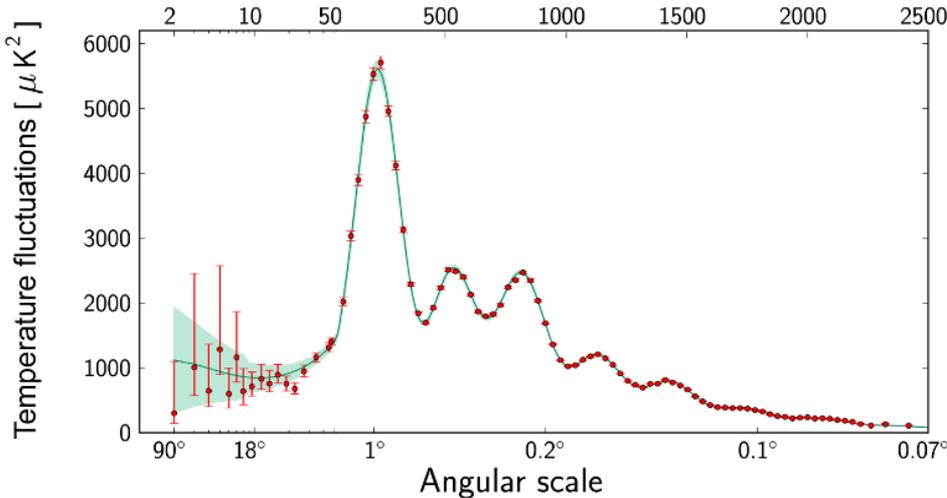
変動の大きさと相関角度から初期宇宙の物質密度がわかる。



月の大きさが約0.5度



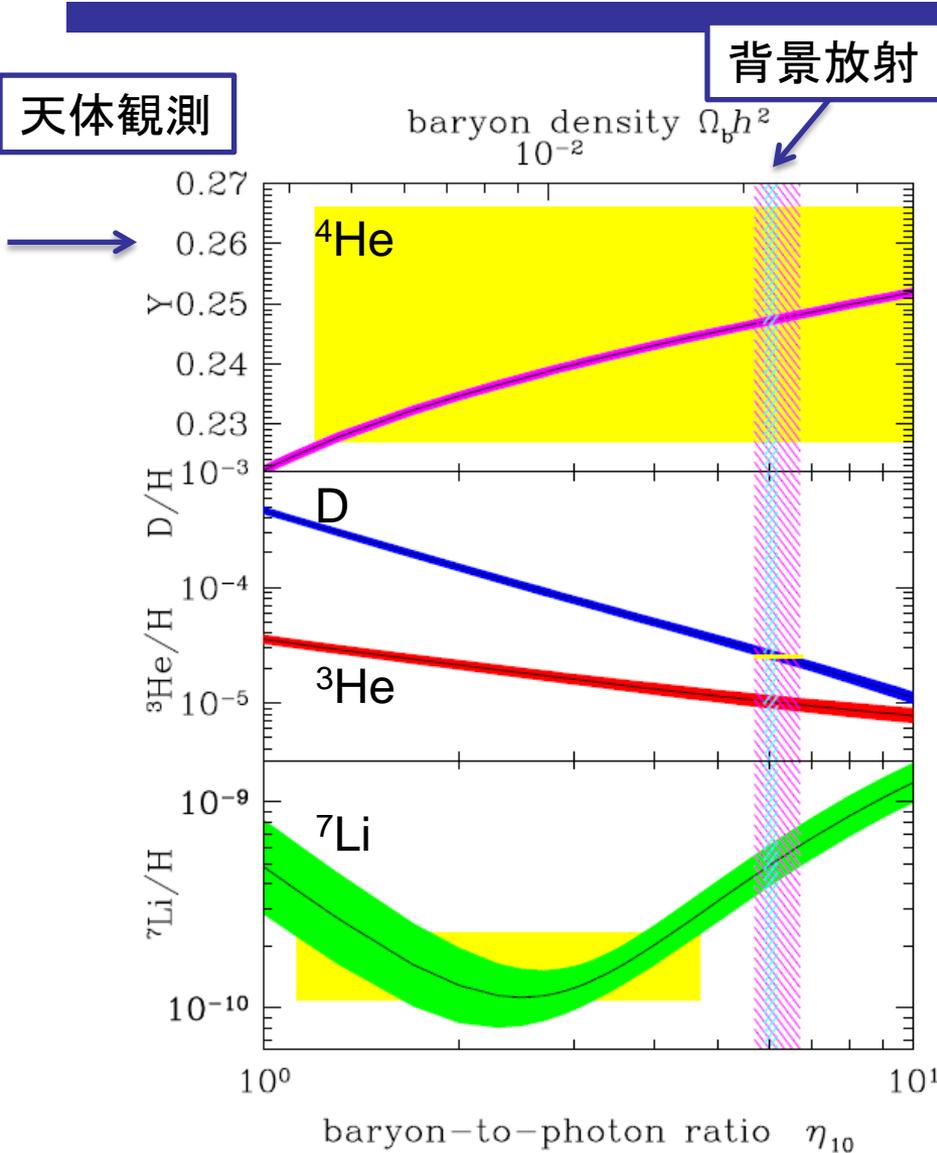
Multipole moment, ℓ



わかること

- (1) 宇宙寿命 (138.2億年)
- (2) ハッブル定数
- (3) **バリオン(物質)と光子の密度比(ρ_b/ρ_γ)**
- (4) 物質と輻射のエネルギー密度比(ρ_b/ρ_γ)
- (5) Etc..

ビッグバン元素合成 v.s. 天体観測 v.s. 背景放射



元素合成計算

PDG2013 推奨値

$$Y_p = 0.2465 \pm 0.0097$$

中性子寿命の影響

$$dY_p/Y_p \sim 0.7 d\tau_n/\tau_n$$

$\Delta[{}^4\text{He}/H](\text{天体観測})$	= 97	} $\times 10^{-3}$
$\Delta[{}^4\text{He}/H](\tau_n:1\%)$	= 17	

Measurement of He in HII region

- HII region

- ▶ OB stars ionize H and He

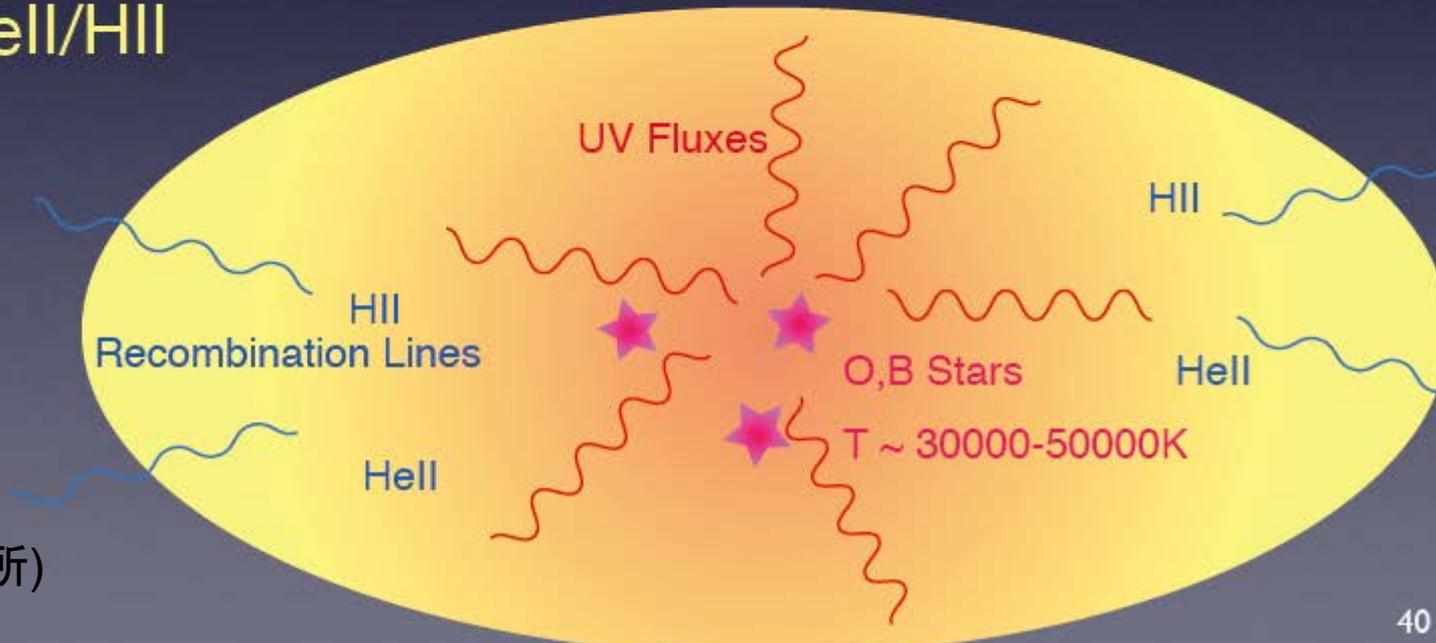
- ▶ $E(\text{HI}) = 13.6\text{eV}$, $E(\text{HeI}) = 24.6\text{eV}$, $E(\text{HeII}) = 56.4\text{eV}$

- Recombination lines



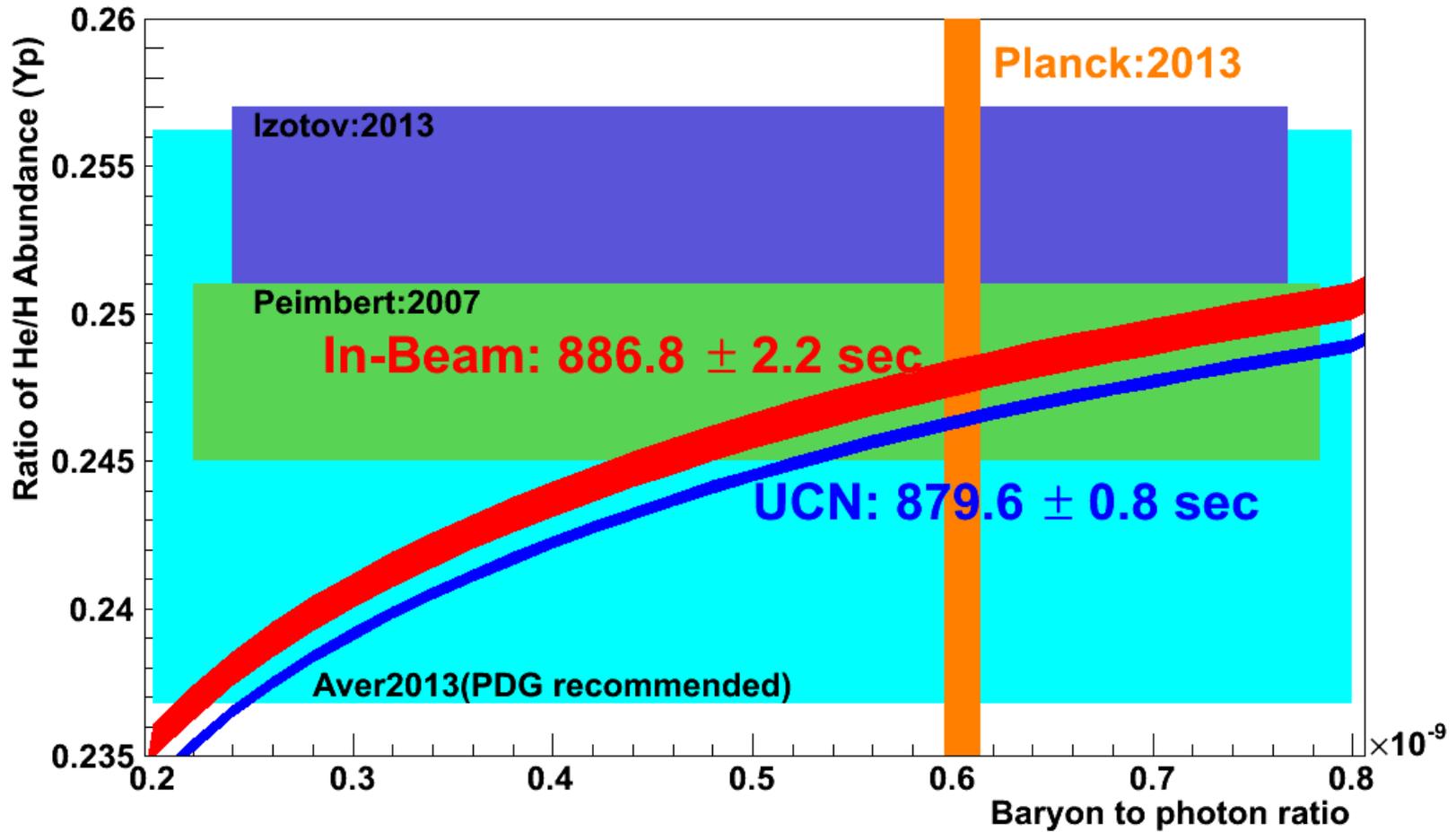
H II HeII

- measure HeII/HII



NGC 6611

Planck & He/H & Neutron Lifetime



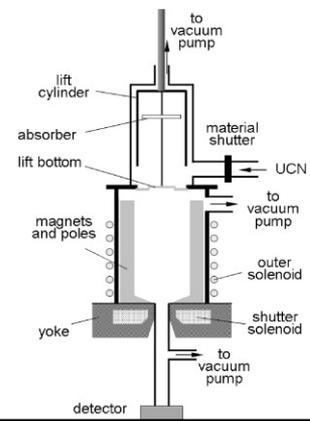
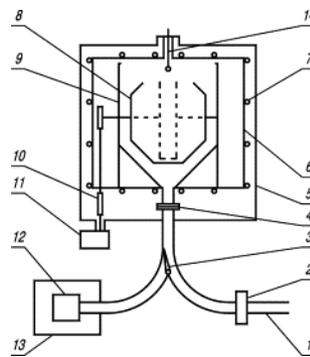
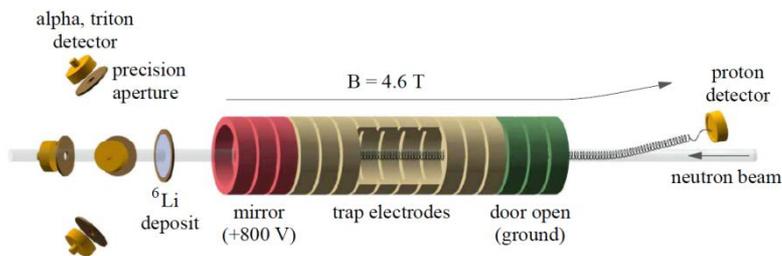
天体観測によるHe/H比は系統的に大きくばらついている。

中性子寿命測定の現状

いろいろな中性子寿命測定

大きく分けて**ビーム法**と**蓄積法**の2種類がある。

手法	Beam	Penning trap	Gravitational trap	Magnetic trap
中性子源	原子炉	原子炉	原子炉	原子炉
エネルギー	冷中性子	冷中性子	超冷中性子	超冷中性子
測定粒子	電子	陽子	中性子	中性子
メリット	flux monitor	low background	small correction	no wall loss
デメリット	high background	flux monitor	wall effect	depolarization
結果	$878 \pm 27 \pm 14$ (1989)	$886.6 \pm 1.2 \pm 3.2$ (2005)	$878.5 \pm 0.7 \pm 0.3$ (2008)	878 ± 1.9 (2009)



ビーム法

手法：中性子fluxと崩壊の個数を測定
 困難：中性子fluxの測定

蓄積法

手法：中性子を貯蔵しなくなる時間を測定
 困難：閉じ込めの完全性 (壁での吸収等)

the Dead

v.s.

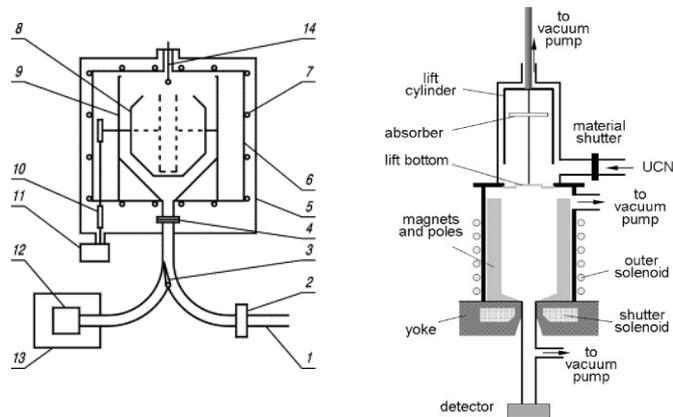
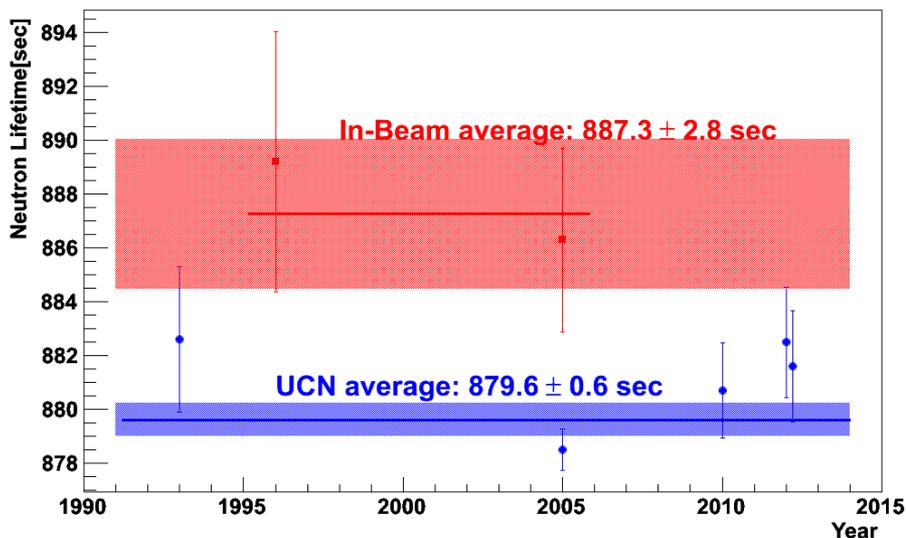
the Survival

いろいろな中性子寿命測定

大きく分けて**ビーム法**と**蓄積法**の2種類がある。

手法	Beam	Penning trap	Gravitational trap	Magnetic trap
中性子源	原子炉	原子炉	原子炉	原子炉
エネルギー	冷中性子	冷中性子	超冷中性子	超冷中性子
測定粒子	電子	陽子	中性子	中性子
メリット	flux monitor	low background	small correction	no wall loss
デメリット	high background	flux monitor	wall effect	depolarization
結果	$878 \pm 27 \pm 14$ (1989)	$886.6 \pm 1.2 \pm 3.2$ (2005)	$878.5 \pm 0.7 \pm 0.3$ (2008)	878 ± 1.9 (2009)

2012年 Particle data group



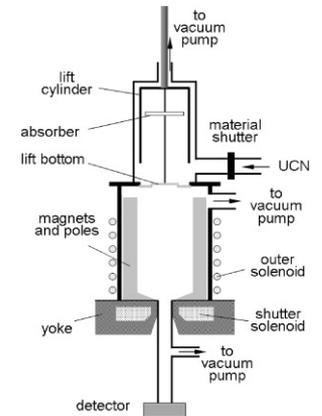
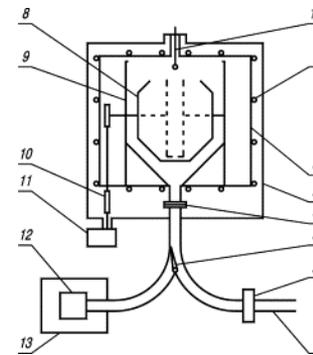
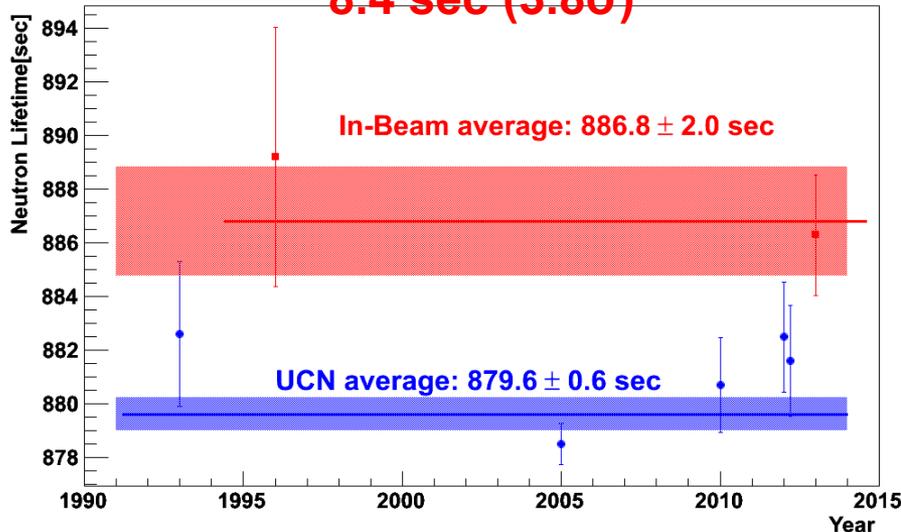
ビーム法と蓄積法で有意なずれ

いろいろな中性子寿命測定

大きく分けて**ビーム法**と**蓄積法**の2種類がある。

手法	Beam	Penning trap	Gravitational trap	Magnetic trap
中性子源	原子炉	原子炉	原子炉	原子炉
エネルギー	冷中性子	冷中性子	超冷中性子	超冷中性子
測定粒子	電子	陽子	中性子	中性子
メリット	flux monitor	low background	small correction	no wall loss
デメリット	high background	flux monitor	wall effect	depolarization
結果	$878 \pm 27 \pm 14$ (1989)	$886.6 \pm 1.2 \pm 3.2$ (2005)	$878.5 \pm 0.7 \pm 0.3$ (2008)	878 ± 1.9 (2009)

2013年 Particle data group
8.4 sec (3.8 σ)



**ビーム法と蓄積法で有意なずれ
より顕著に！
独立で高精度な測定が必要。**

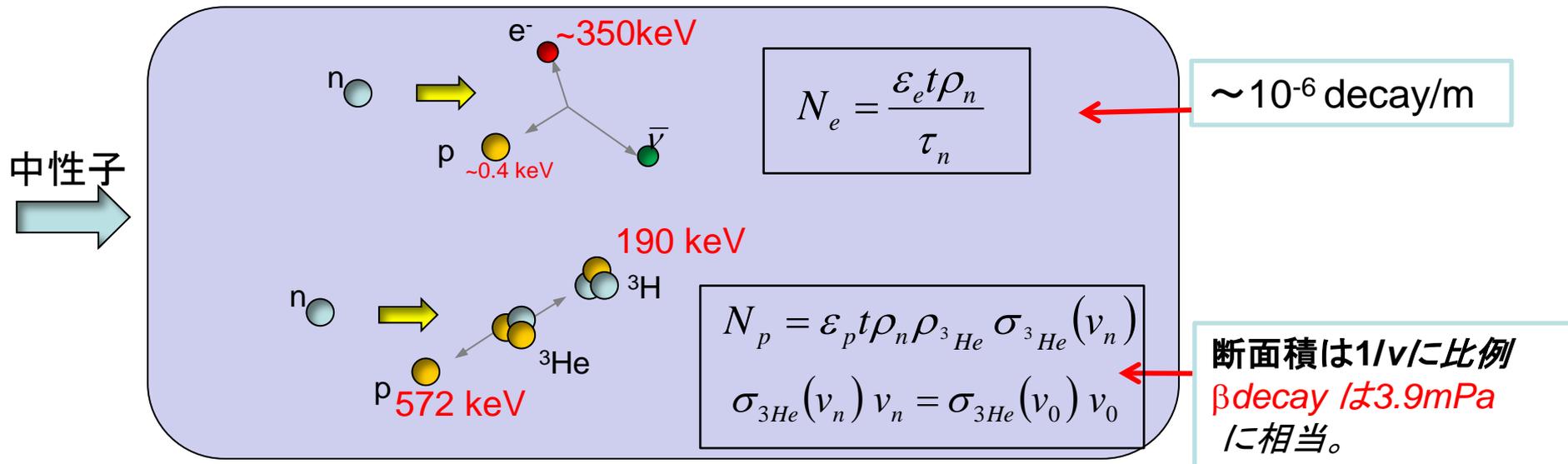
Neutron lifetime experiment at J-PARC

J-PARCにおける中性子寿命実験:測定手法

中性子崩壊からの電子と ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反応を比較することで
寿命を精度よく求める。 **目標精度 ~0.1%**

先行実験
kossakowski, 1989

検出器として ${}^4\text{He-CO}_2$ gas + 100mPa ${}^3\text{He}$ を使ったTime projection Chamberを用いる。



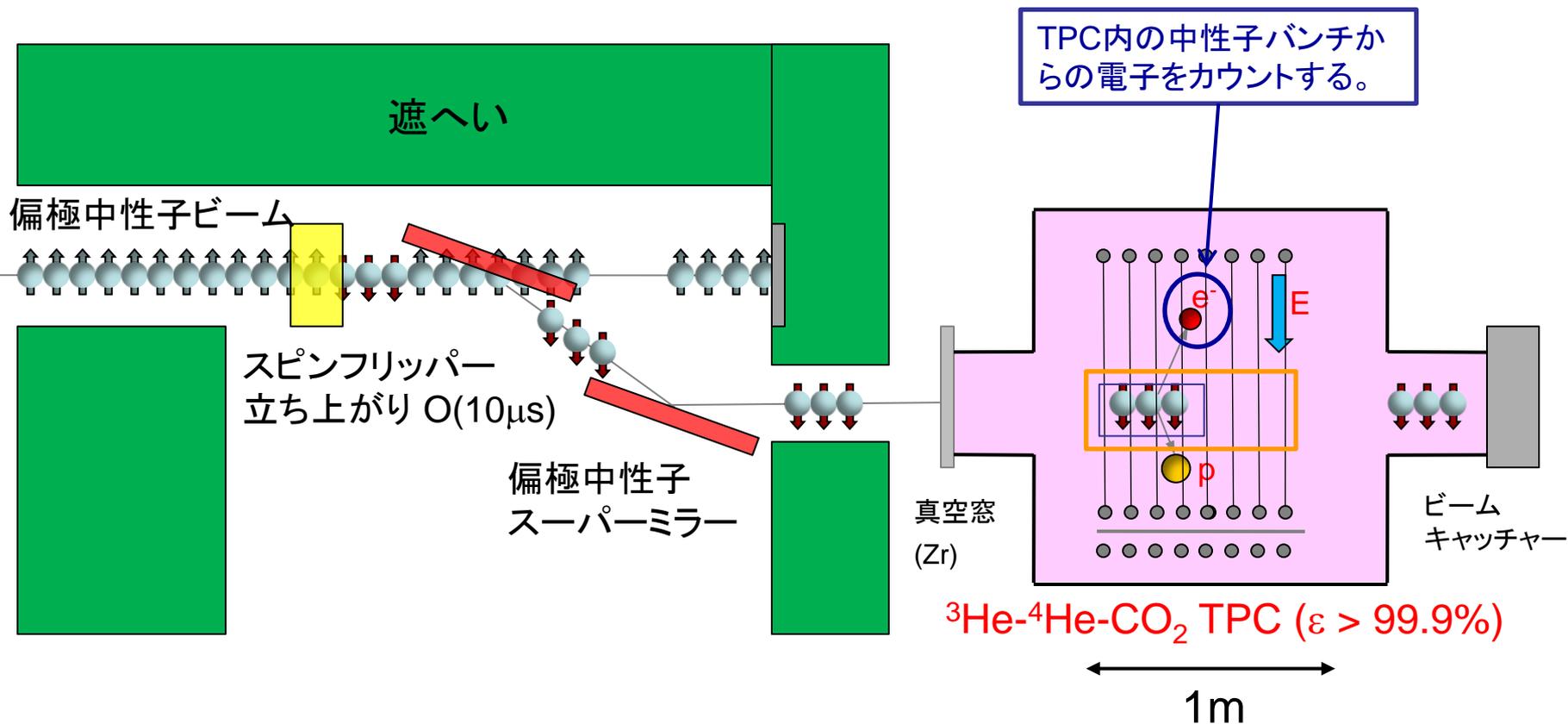
中性子崩壊数も ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反応数も1/vに
比例するので、速度には依存しない。

$$\tau_n^{-1} = \frac{N_e / \varepsilon_e}{N_p / \varepsilon_p} \rho_{{}^3\text{He}} \sigma_{{}^3\text{He}}(v_0) v_0$$

N_e, N_p : Electron and proton counts
 $\varepsilon_e, \varepsilon_p$: Detection efficiencies
 $\rho_{{}^3\text{He}}$: Atom density of ${}^3\text{He}$
 v_0 : 2200 m/s
 $\sigma_{{}^3\text{He}}(v_0)$: Cross section of ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$
 at 2200m/s

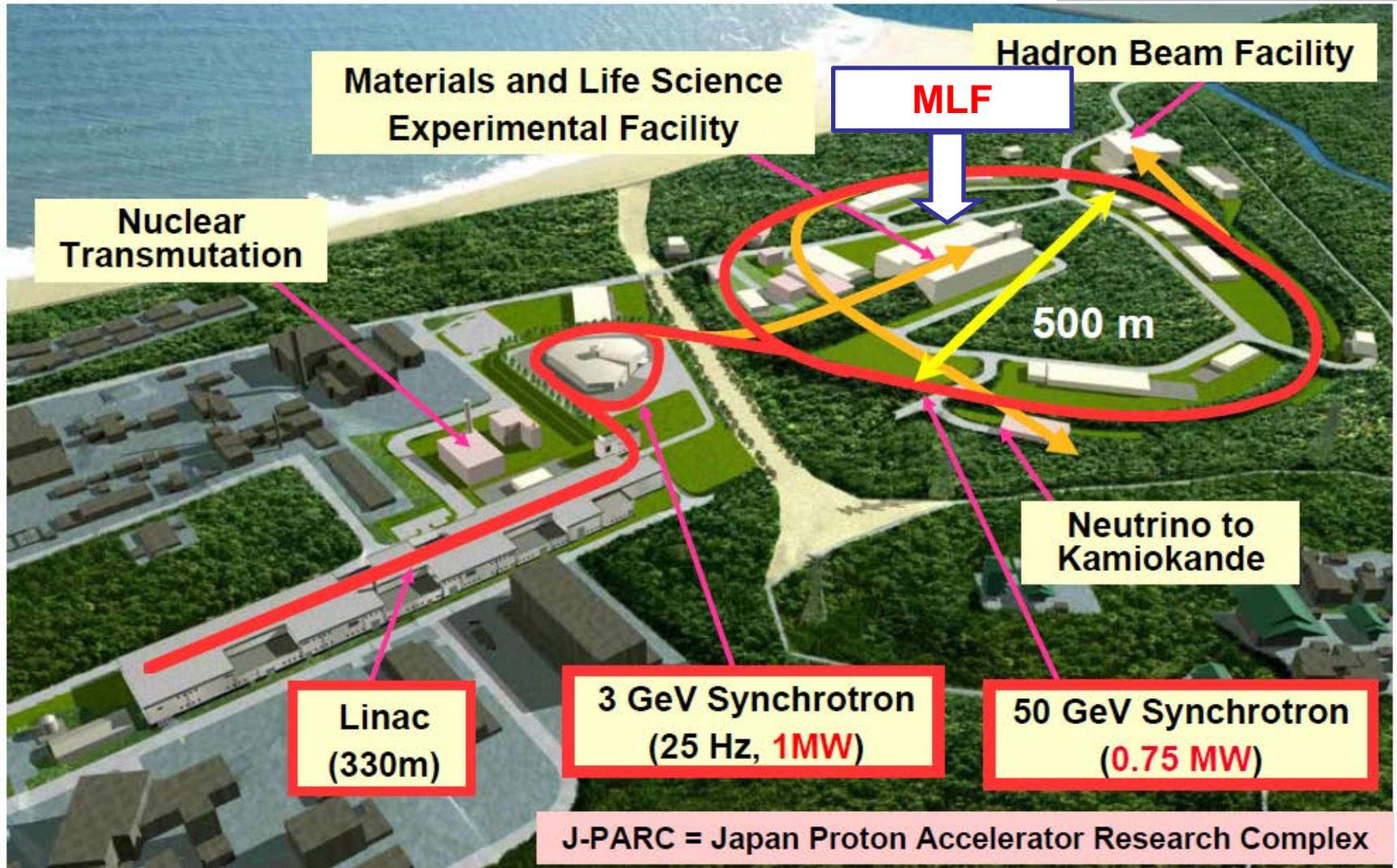
J-PARCからのパルス中性子をバンチ化する。

パルス中性子を**スピンドリッパー**を用いてチョップすることにより等速度の**中性子バンチ**を作る。中性子がTPC内に完全に入っているときの計数を使うことにより、**ビーム領域**を完全に定義できる。



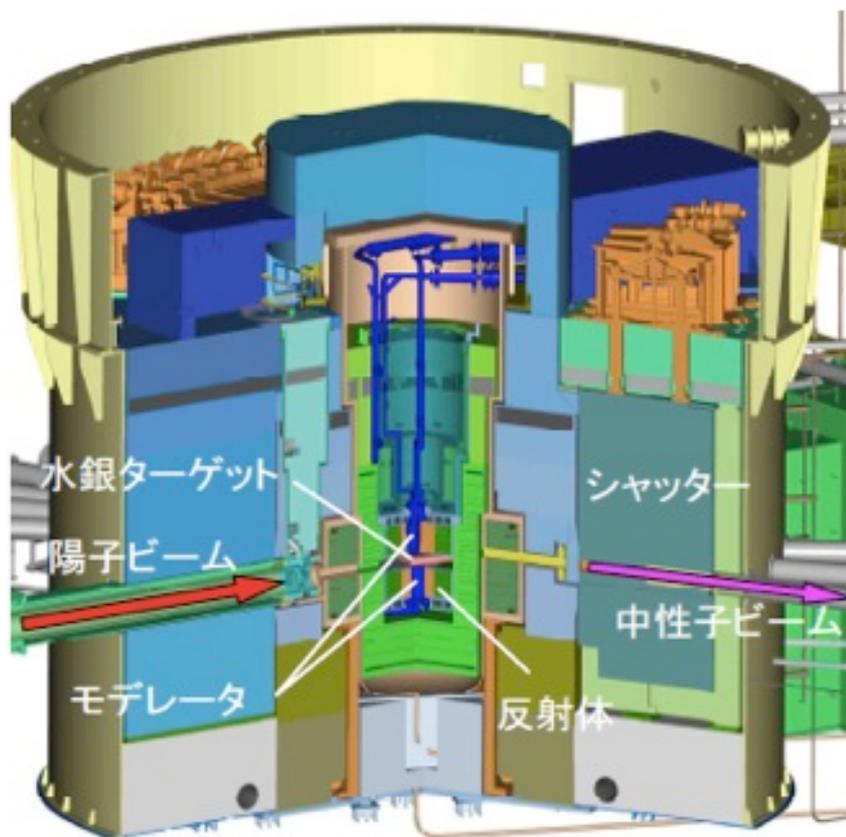
Beamline: J-PARC BL05

J-PARC Tokai Japan

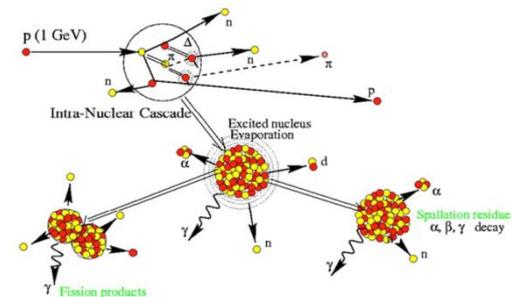


Joint Project between KEK and JAEA

Proton加速器 3GeV-1MW (デザイン)の Pulsed Neutron Source



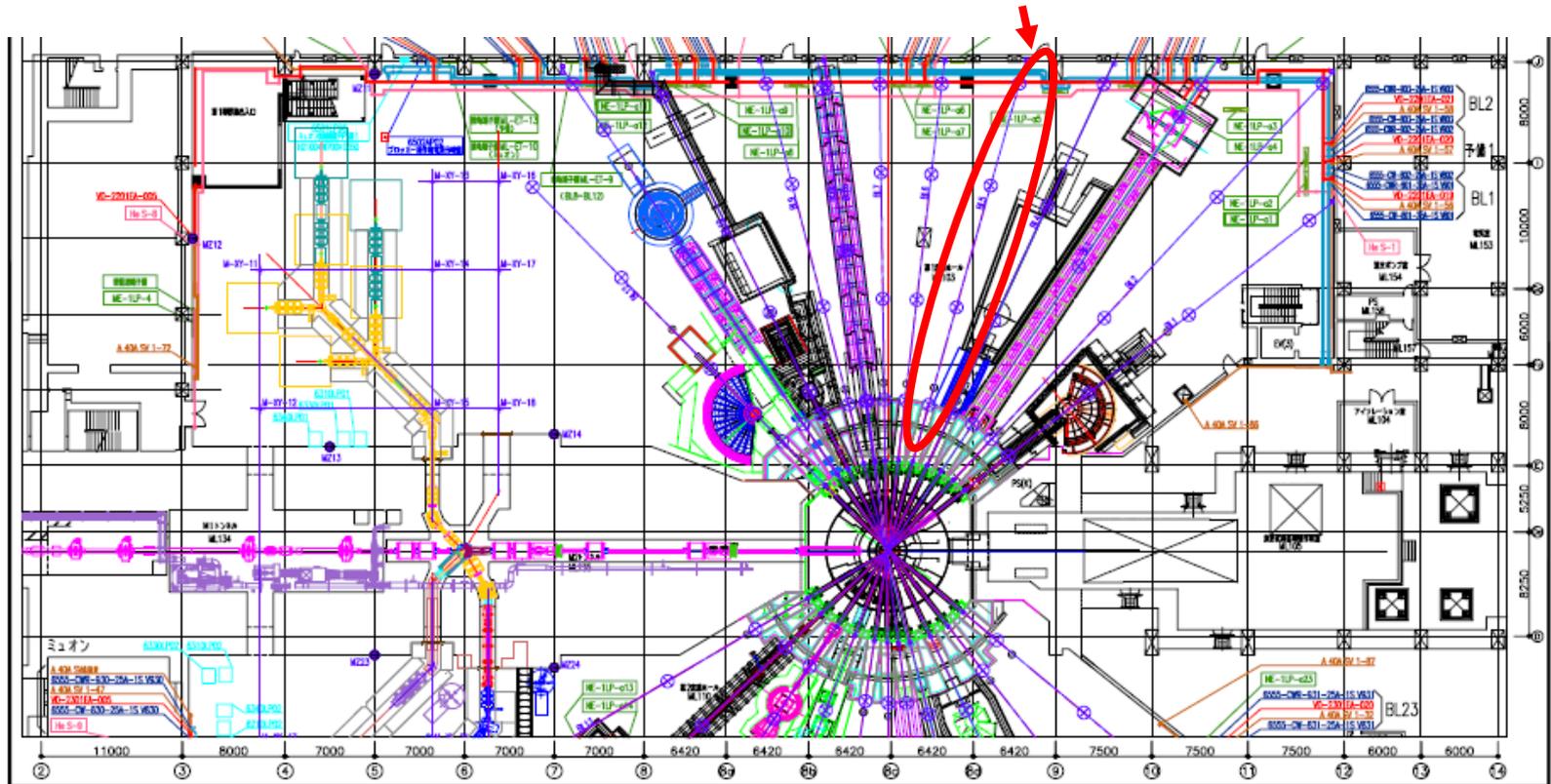
陽子ビームを液体水銀ターゲットに照射し、核破砕反応を起こす。1陽子あたり**20個**程度の中性子が発生。



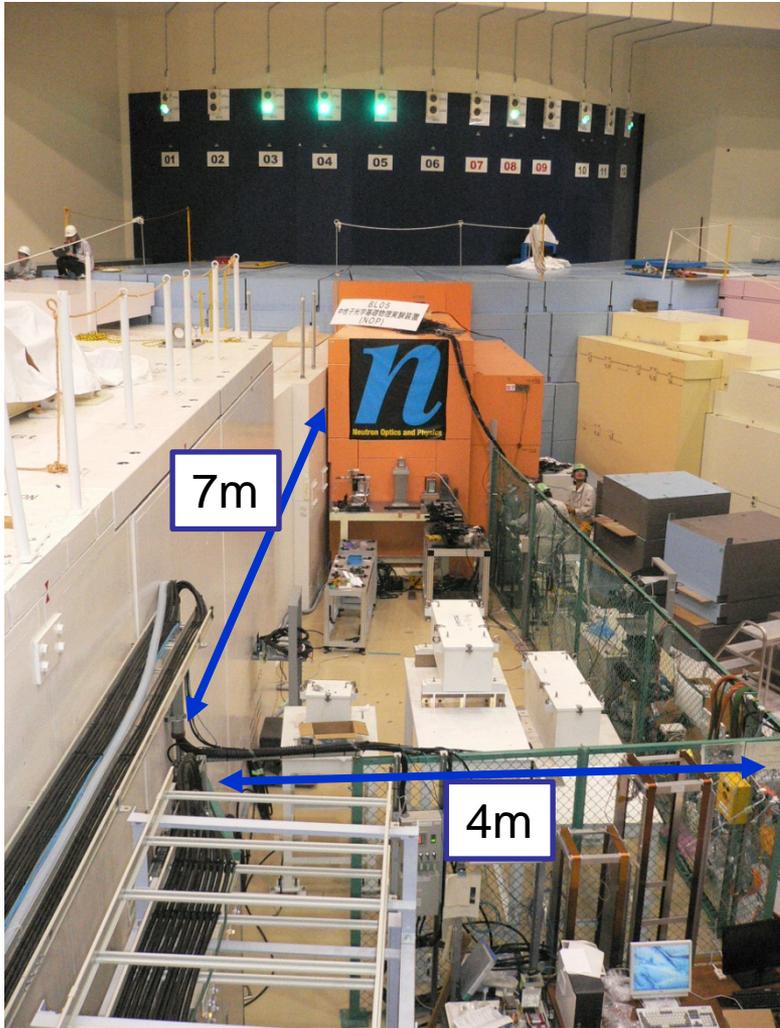
核破砕によって発生した中子はモデレータで50K程度まで冷却され、23本ある各ビームラインに輸送される。

MLF実験施設第一実験ホールBL05ビームライン $\Phi_n \sim 10^9 / \text{cm}^2 / \text{sec} / \text{MW}$ (Coupled moderator)

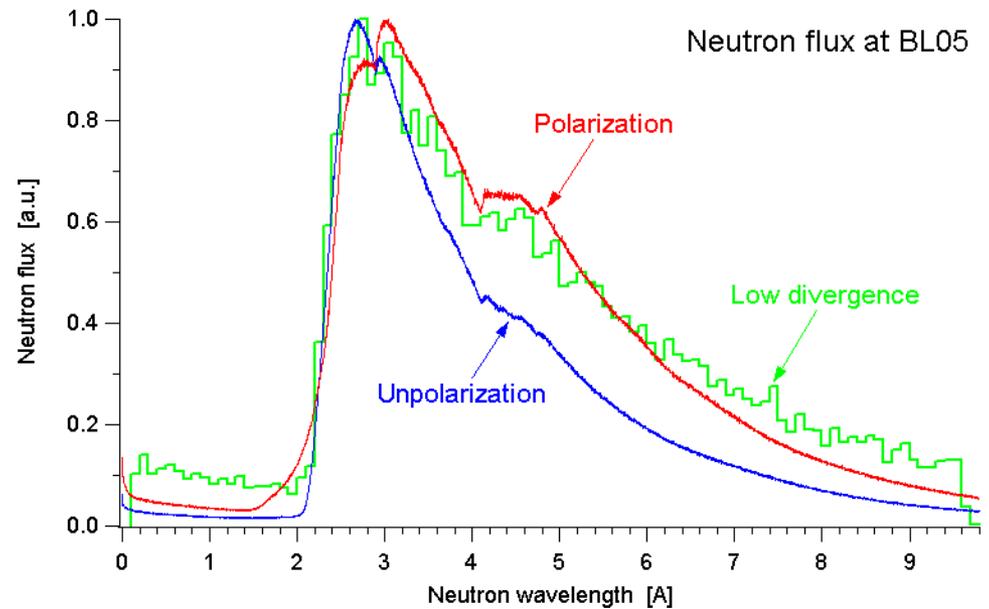
BL05 for Fundamental physics



BL05 - the NOP beamline at J-PARC/MLF



Performance of BL05 Beam line



Beam flux at 1MW

3.9×10^7 n/cm²/s (23mrad x 9mrad)

9.4×10^7 n/cm²/s (11mrad x 9mrad)

4.3×10^5 n/μstr/cm²/s

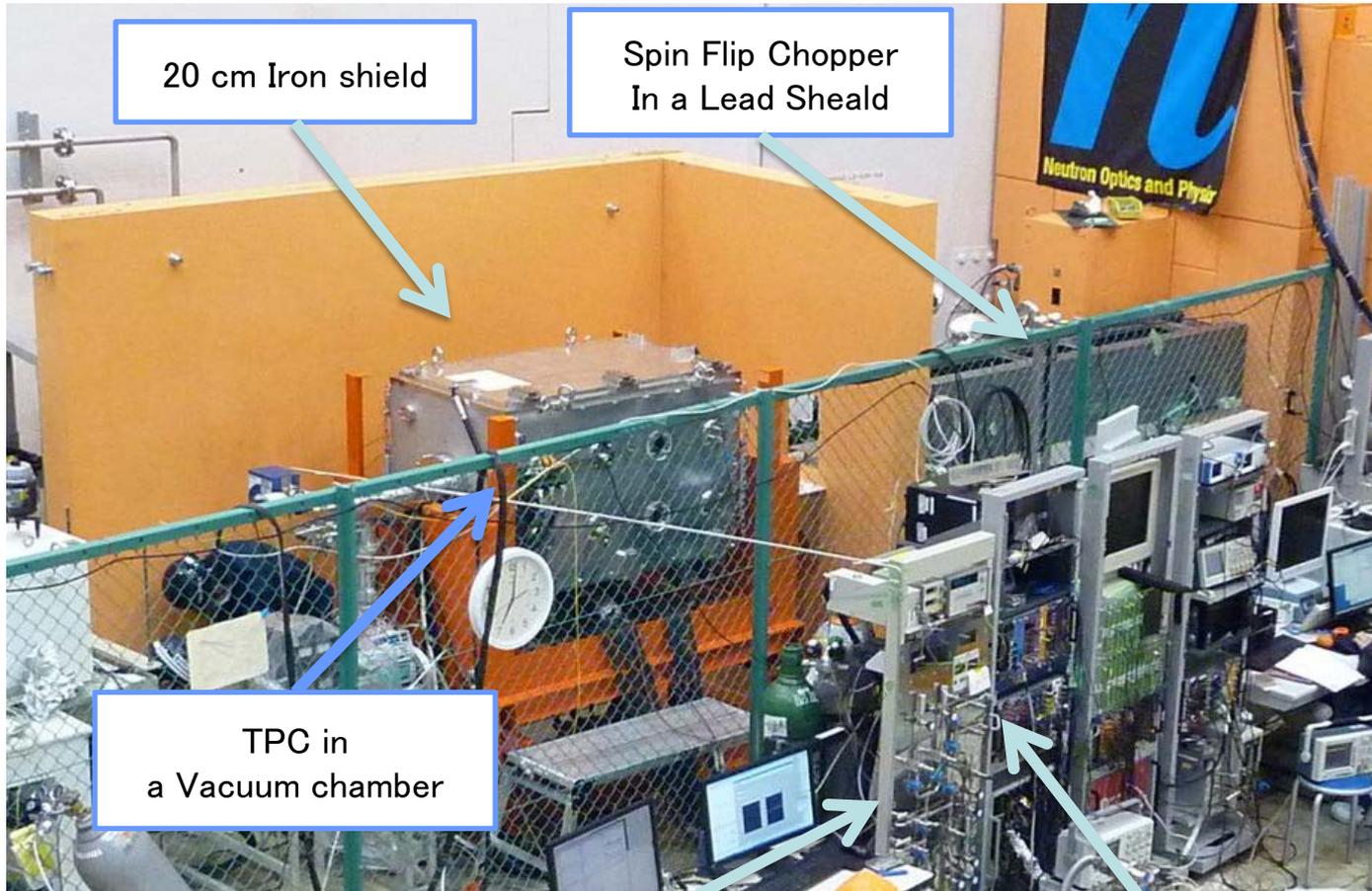
2008年12月より稼働。



Setup

Set up of our experiment in “NOP” beam line.

TPC in the vacuum chamber



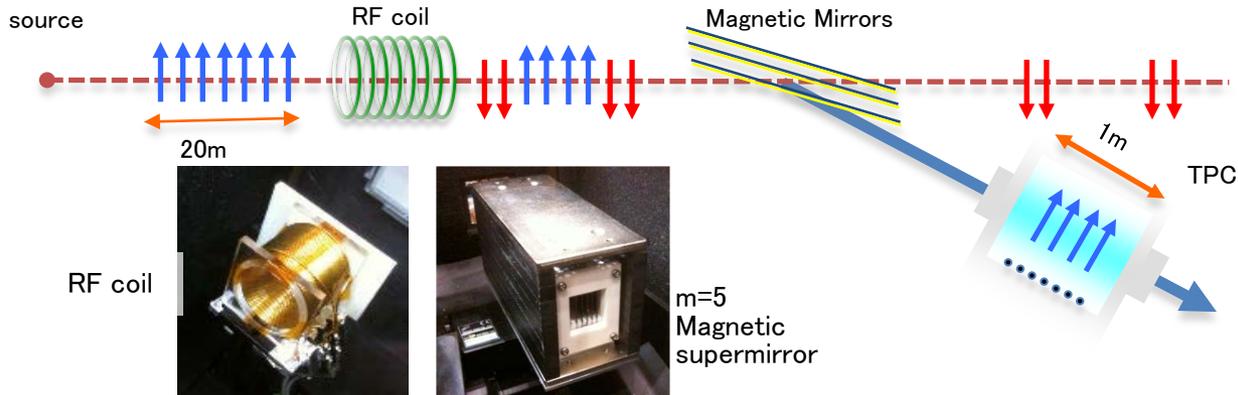
Inside of
Lead shielding



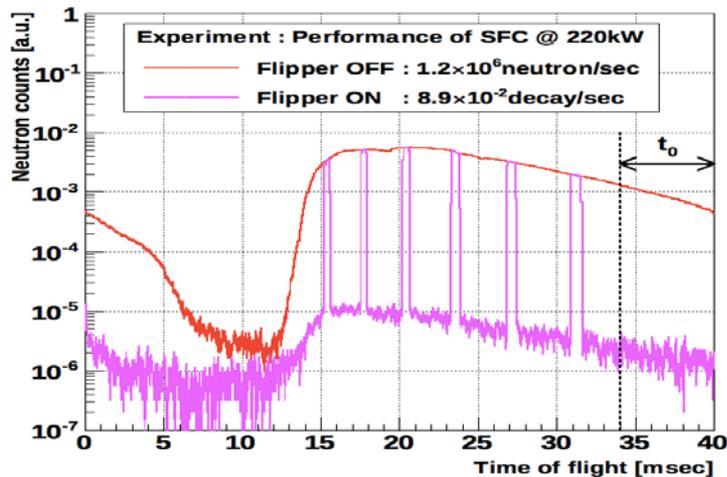
Inside of
Cosmic ray Veto



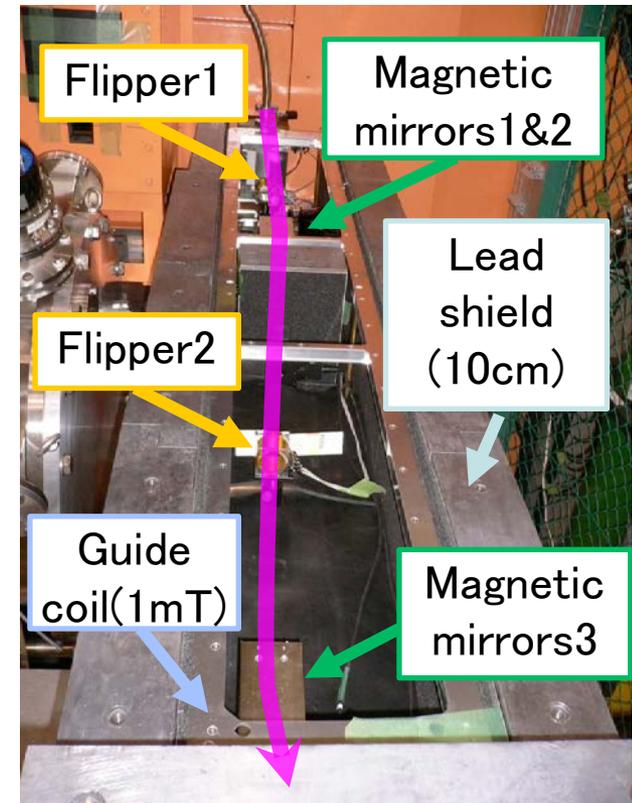
Details of setup (Spin Flip Chopper)



Resonance flippers flip the neutron spin.
Magnetic supermirror reflects only non-flipped neutrons.

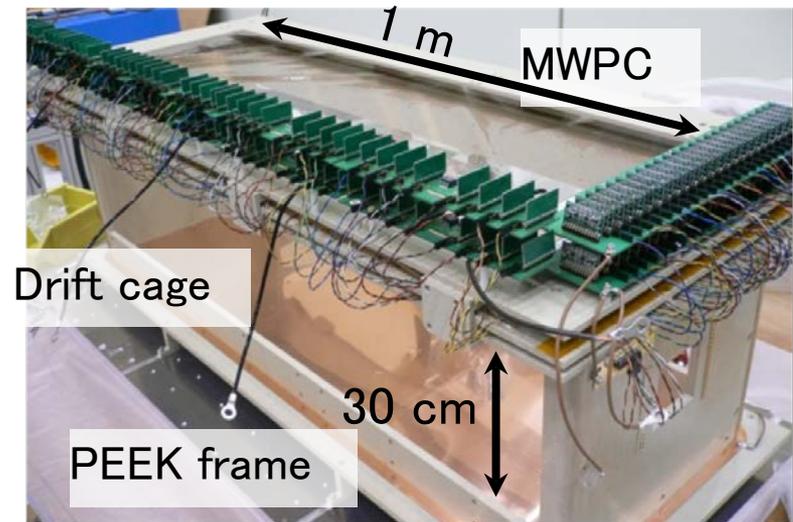
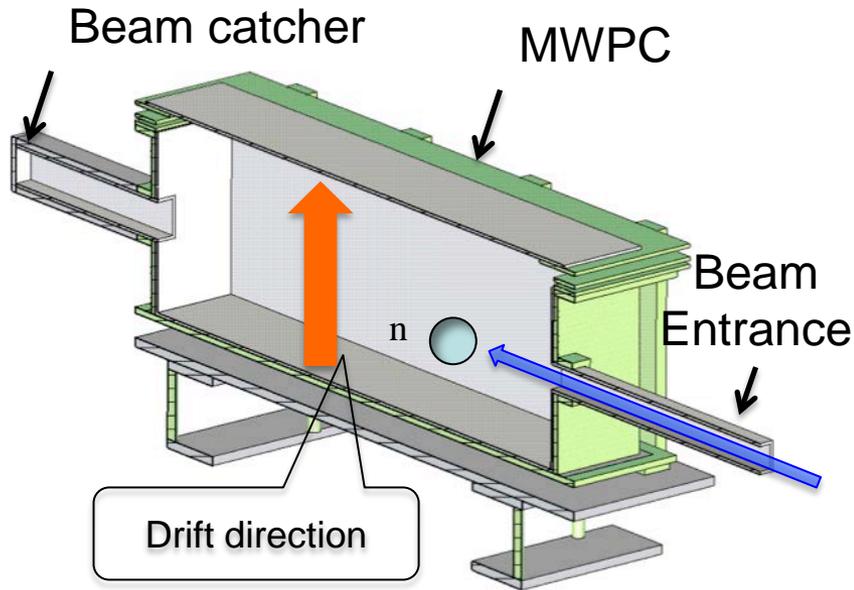


5 bunches injected
contrast 400:1



Details of setup (Time Projection Chamber)

We developed the TPC which has a low background count rate and a high efficiency for β -rays.

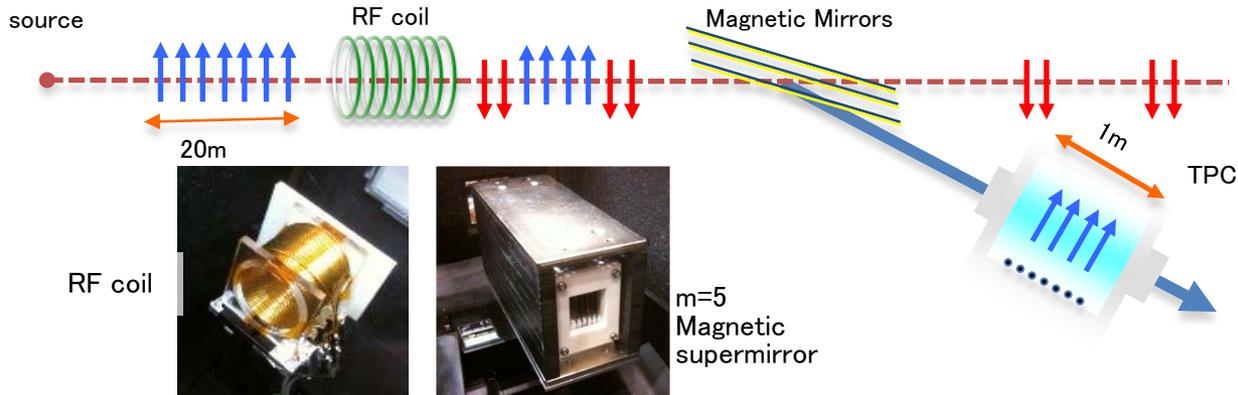


Anode wire	29 of W-Au wires(+1750V)
Field wire	28 of Be-Cu (0V)
Cathode wire	120 of Be-Cu (0V)
Drift length	30 cm (-9000V)
Gas mixture	He:CO ₂ =85kPa:15kPa
TPC size(mm)	300,300,970

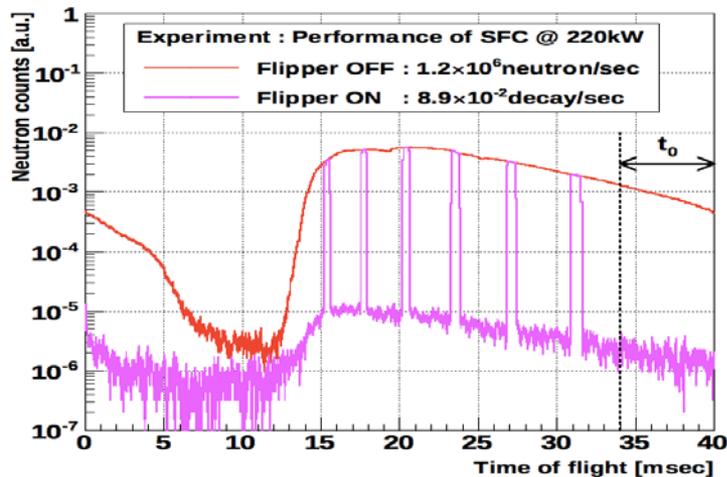
High efficiency detection for **both of β -decay and ^3He reaction**

PEEK frame & inner ^6Li wall suppress BG. S/N \sim 1:1

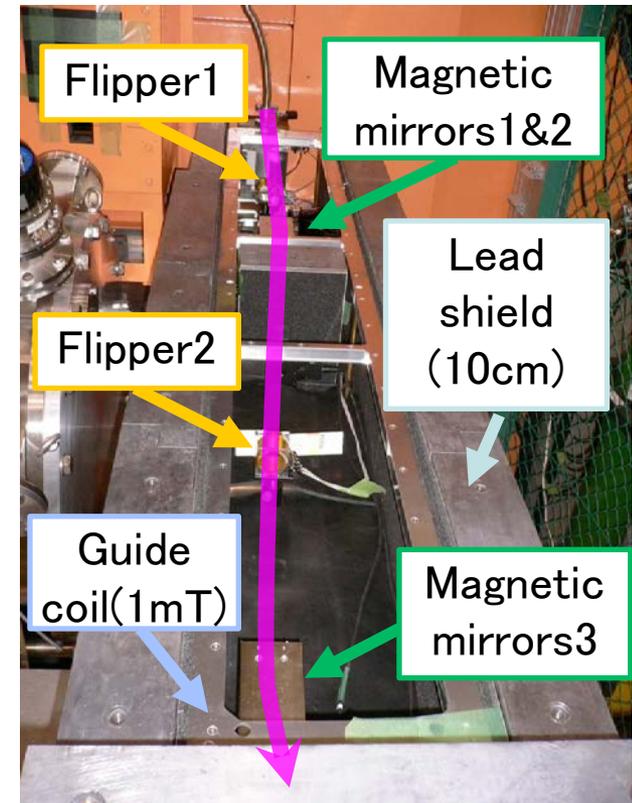
Details of setup (Spin Flip Chopper)



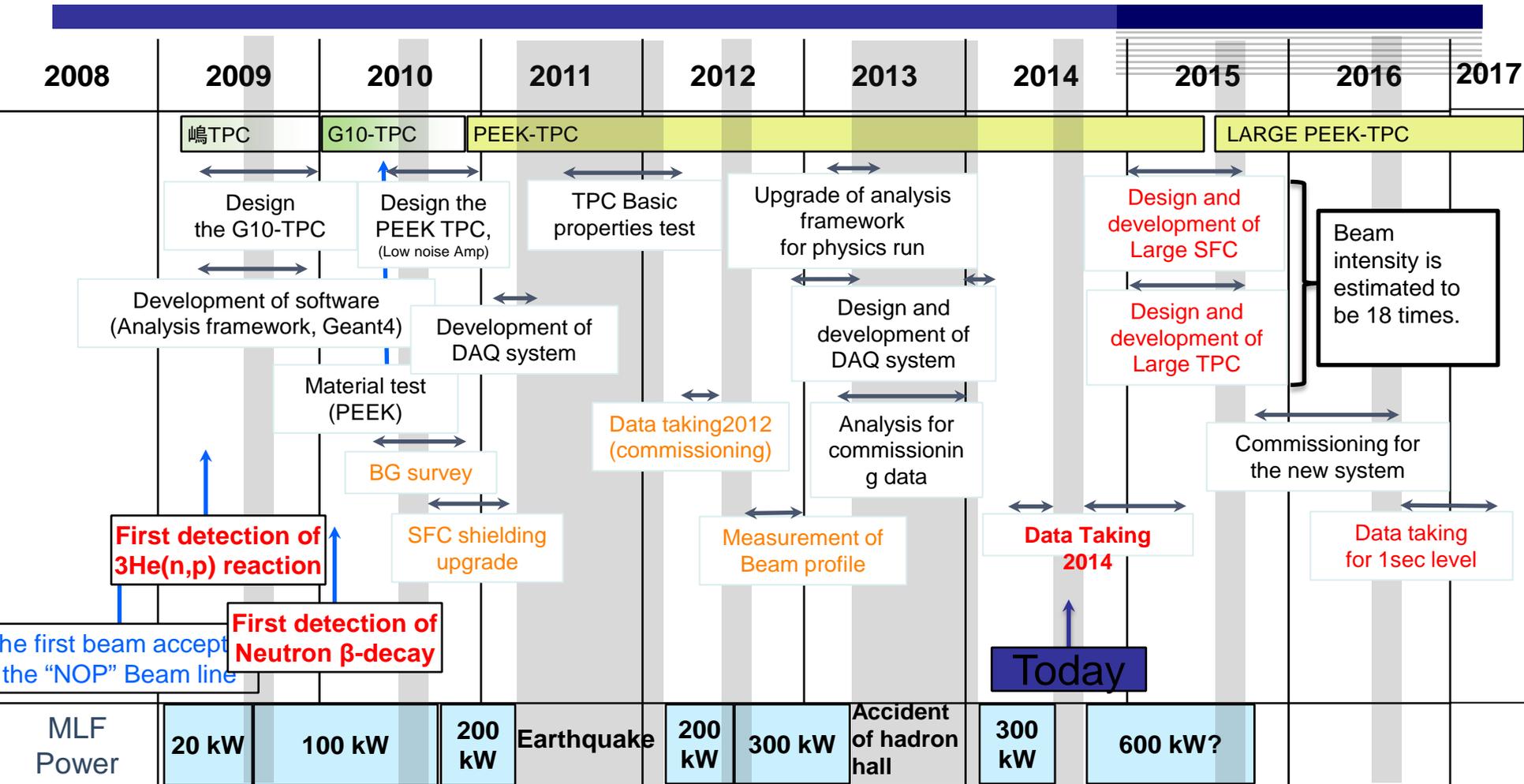
Resonance flippers flip the neutron spin.
Magnetic supermirror reflects only non-flipped neutrons.



5 bunches injected
contrast 400:1



chronological table



Increasing size the Spin Flip Chopper is planned at 2014/2015.
 Intensity will be 18 times by a designed value.
 We will start physics run to 1sec at 2016/2017

まとめ

- 近年のWMAP/PlanckのCMB観測からBBNの精密測定により初期宇宙(~ 1 sec)を探索できる可能性が出てきた。
 - 天体観測(Y_p)の値は解析方法に大きく依存。
 - そのためには中性子寿命をしっかりと決める必要がある。現在は測定手法により8.4sec(3.8σ)のずれ。
 - Li問題は重要な未解決問題である。
- J-PARC/MLF/BL05で1秒の精度を目指した中性子寿命実験を遂行中。