

J-PARCにおける 中性子寿命精密測定実験

東京大学 ICEPP

D2 山田崇人

21st ICEPP Symposium

2015/02/10

中性子寿命測定実験@J-PARCに関する 21st ICEPP Symposium での発表

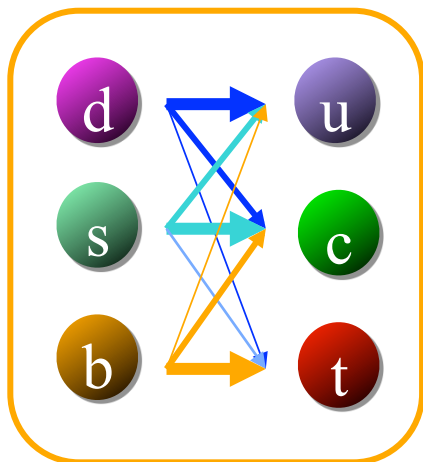
- 山田 崇人 (東京大学)
 - J-PARCにおける中性子寿命精密測定実験
 - 全体像、現状
- 長倉 直樹 (東京大学)
 - 中性子寿命測定のための
中性子フラックスモニターの性能評価
 - 典型的な中性子検出器であるGas検出器with ^3He の性能評価
- 角 直幸 (九州大学)
 - J-PARC/BL05における中性子寿命測定実験:
2014年データ解析
 - 現在の解析の進捗状況について

Outline

- Physics
 - CKM matrix
 - Big Bang Nucleosynthesis
- Principle
- Setup
 - Beam line
 - Device / Detector / DAQ
- Event Display
- Back ground subtraction
- Summary

中性子寿命の物理: CKM-matrix

CKM行列のユニタリティの検証と中性子寿命



$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 0.97427 \pm 0.00014 & 0.22536 \pm 0.00061 & 0.00355 \pm 0.00015 \\ 0.22522 \pm 0.00061 & 0.97343 \pm 0.00015 & 0.0414 \pm 0.0012 \\ 0.00886^{+0.00033}_{-0.00032} & 0.0405^{+0.0011}_{-0.0012} & 0.99914 \pm 0.00005 \end{pmatrix}$$

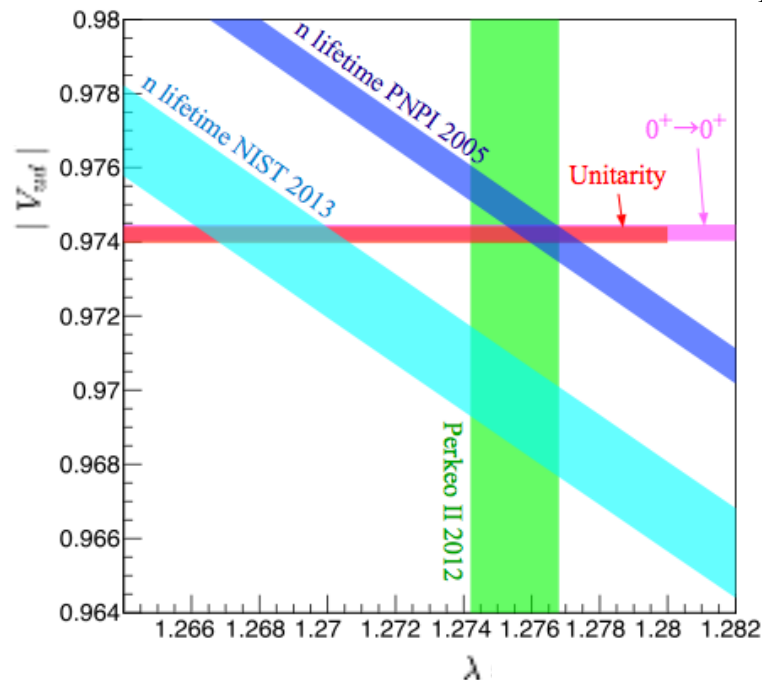
PDG2014

CKM行列の V_{ud} は中性子寿命と λ から導出できる

$$|V_{ud}|^2 = \frac{(4908.7 \pm 1.9)s}{\tau_n (1 + 3\lambda^2)},$$

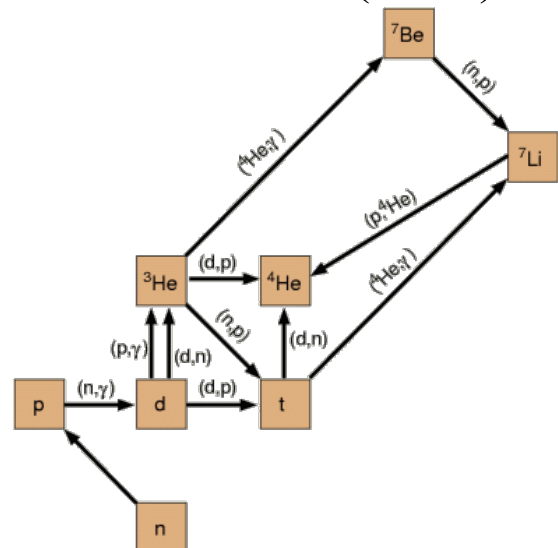
W. J. Marciano and A. Sirlin, Phys. Rev. Lett. 96, 032002 (2006)

一方、中性子寿命には測定手法により 3.8σ の差異があり、ユニタリティの検証のためには中性子寿命の検証が必要となっている。



中性子寿命の物理: Big Bang Nucleosynthesis

ビッグバン元素合成(BBN)の検証



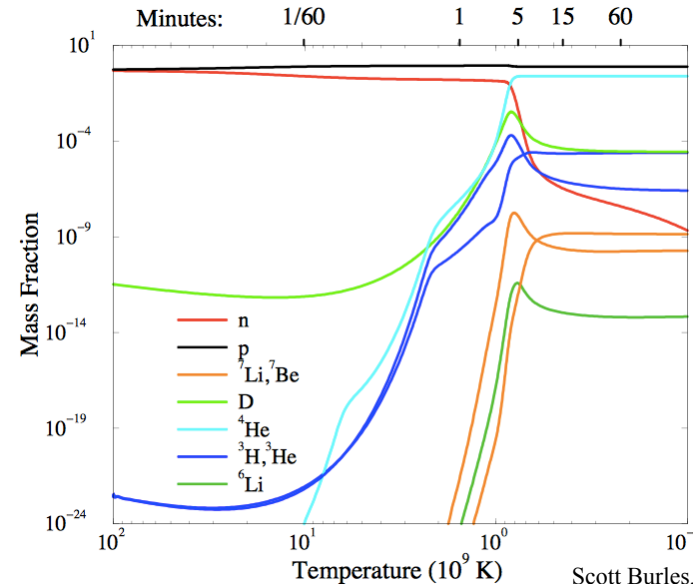
http://www.einstein-online.info/spotlights/BBN_phys

BBNを仮定すれば、 $He/(H+^4He)$ はBaryon-to-photon ratioと中性子寿命から予言できる。

$$Y_p = 0.228 + 0.01 \ln \eta_{10} + 0.012(N_\nu - 3) + 0.185 \frac{\tau_n - 889.8}{889.8}$$

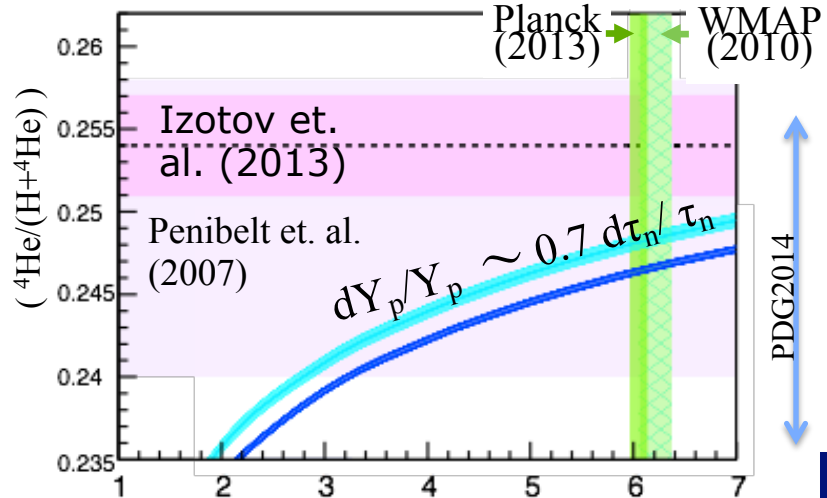
Richard H Cyburt, Brian D Fields, and Keith A Olive. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2008(11):012, (2008).

一方、初期天体の輝線・吸収線スペクトルから $He/(H+^4He)$ は観測値があり観測によってはBBNの予言値とズレが見え始める可能性がある。



Scott Burles, et al. arXiv:astro-ph/9903300

Abundance of light elements is lead by **lifetime** in **Big Bang Nucleosynthesis**.

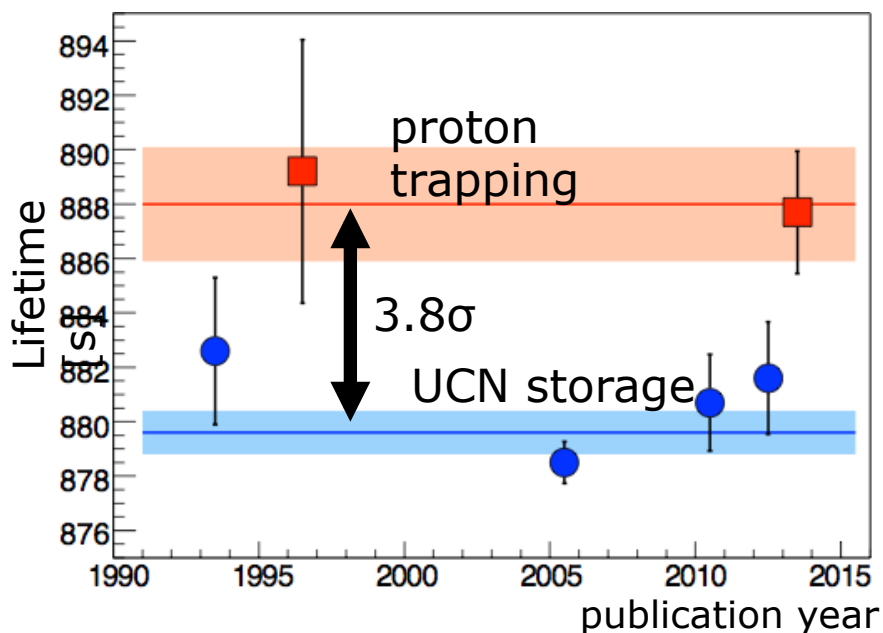


中性子寿命測定の方法ごとの差異

中性子寿命 $\tau_n = 880.3 \pm 1.1$ sec (PDG2014)

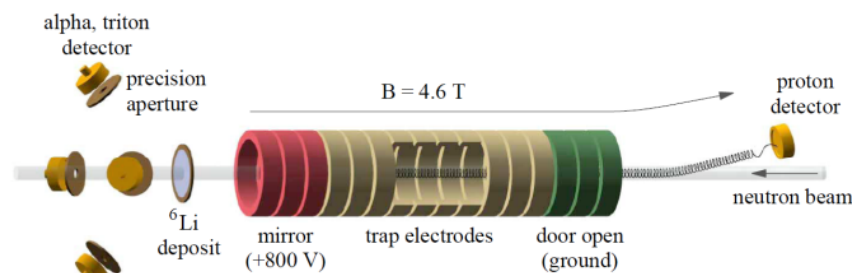
中性子寿命測定では2つの測定手法により、**8.4sec(3.8 σ)の差が見えている。**

In-beam method: Proton 検出, Fluxは別検出器

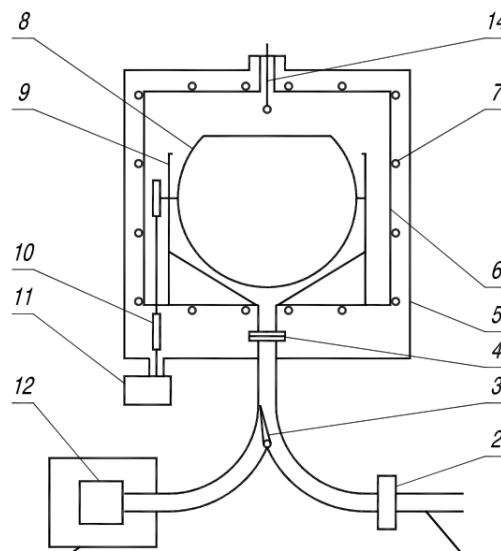


A.T. Yue et. al., PRL 111, 222501 (2013)

**別の手法で世界平均の
1sec精度での測定を目指す**



Storage method: 超冷中性子を貯め、
減少量から崩壊数を評価



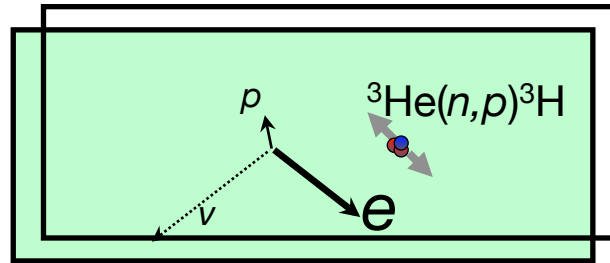
本実験の測定原理

冷中性子をTime Projection Chamber (TPC)に導入し、
β-decay と ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反応を同一検出器で同時に計測する。

Kossakowski,1989

β崩壊と ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ を同時計測

TPCより短く
バンチ化した中性子



$$\tau_n = \frac{1}{\rho\sigma_0v_0} \left(\frac{S_n/\epsilon_n}{S_\beta/\epsilon_\beta} \right)$$

β-decay

$$S_\beta = \epsilon_e N \frac{L}{\tau_n v}$$

τ_n : lifetime of neutron

v : velocity of neutron

ϵ_e : detection efficiency of electron

${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$

$$S_n = \epsilon_n N \rho \sigma L$$

ϵ_n : detection efficiency of ${}^3\text{He}$ reaction

ρ : density of ${}^3\text{He}$

σ : cross section of ${}^3\text{He}$ reaction

$$\sigma v = \sigma_0 v_0 \quad \sigma_0 = \text{cross section}@v_0, v_0 = 2200[\text{m/s}]$$

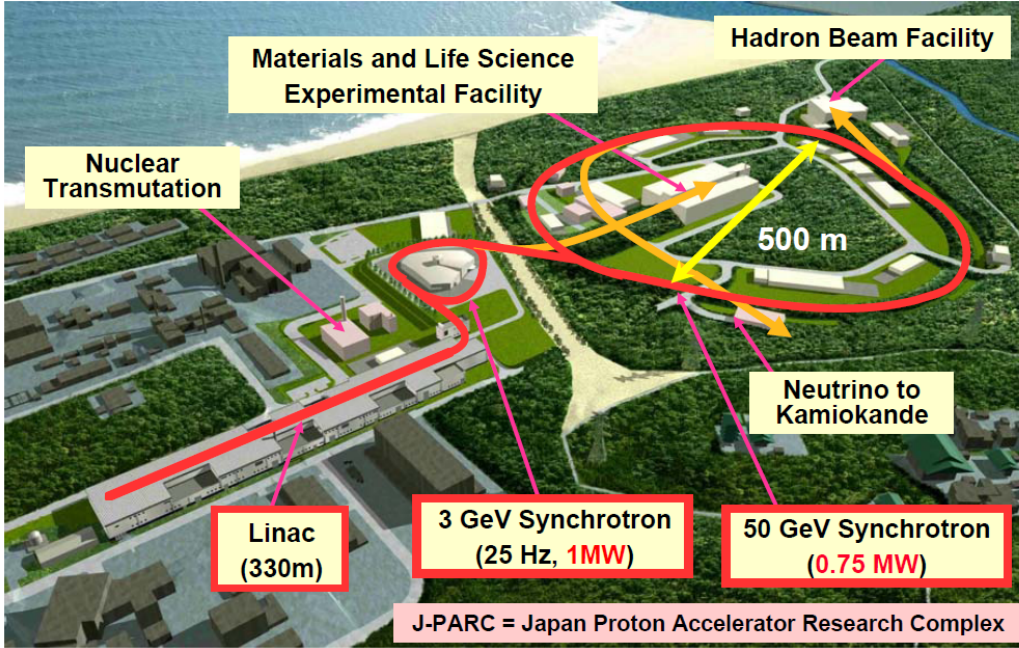
本手法は、現在の世界平均を決めている他の測定手法で問題であった、
β崩壊検出器以外のフラックスモニターや、蓄積時の壁でのロスなどの系
統誤差要因を持たない、全く別の測定手法となっている。

この手法で、他の実験と同等の1 sec 精度の測定を目指す。

J-PARC / MLF / BL05

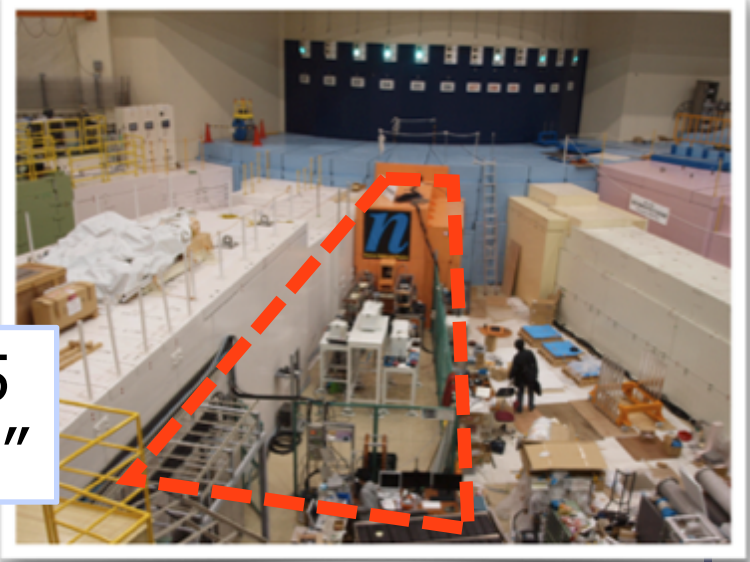
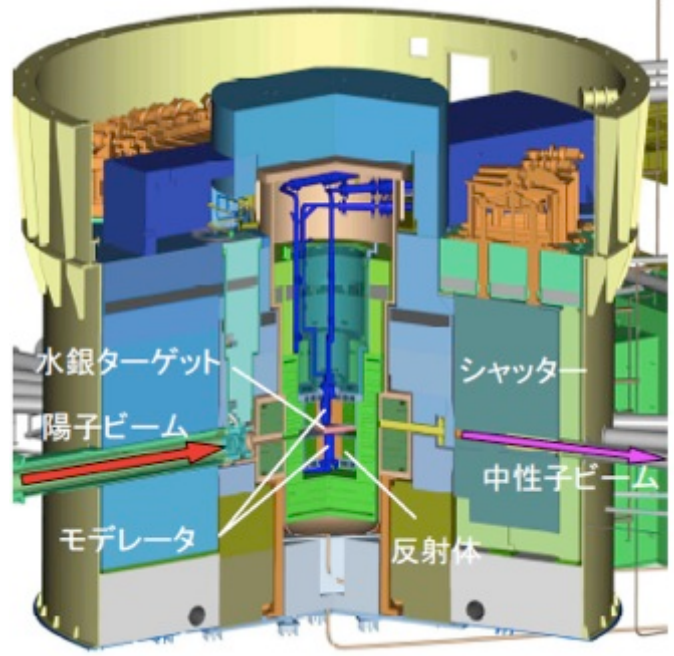
MLF target

J-PARC
Materials and Life Science Experimental Facility(MLF)
Beam line BL05
Neutron optics and physics(NOP)



J-PARC = Japan Proton Accelerator Research Complex

Joint Project between KEK and JAEA

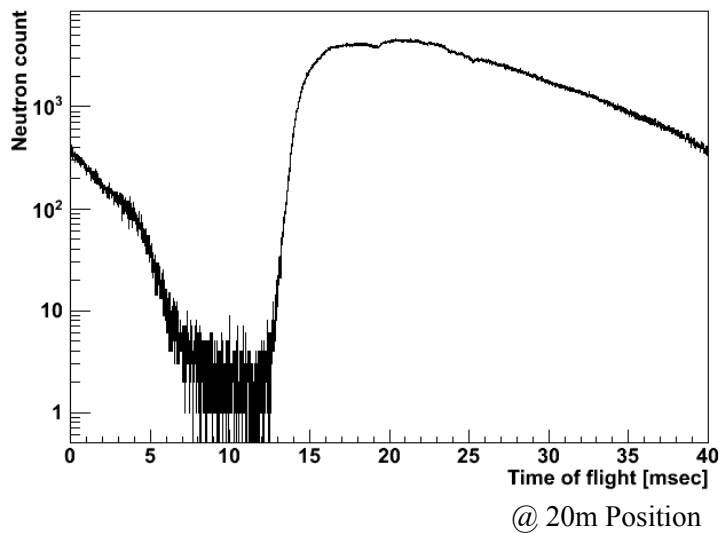


BL05
"NOP"

Neutron beam source

“NOP” / Polarization beam branch

Repetition rate	25Hz(40ms)
Moderator	coupled (20 K)
Beam size	10 cm x 4 cm
Flux	3.9×10^7 /s/ cm ² @1MW
Polarization	95%
Energy	1 ~ 20 meV
wavelength	0.2 ~ 1 nm
Velocity	500 ~ 2000 m/s



他の研究テーマ

Neutron EDM → CP Violation

大強度ブランチのCold neutronをUCNまで冷却
デバイス開発に役立っている

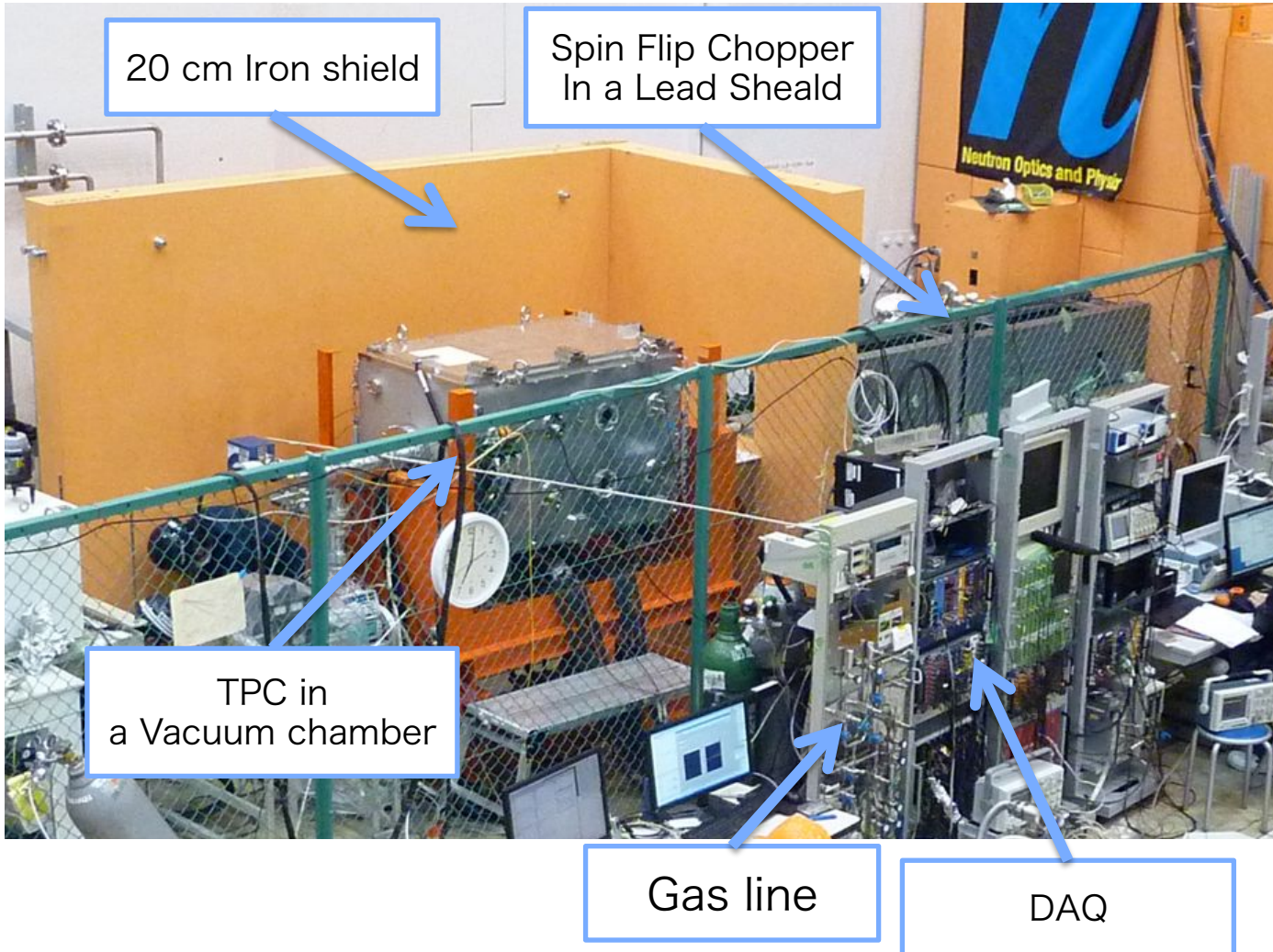
Short-range gravity → Large Extra dimension

低発散ブランチのneutronを希ガスにあてて
小角散乱を検出。今年に物理ランの予定。

Setup on Beamline

“NOP” ビームラインの中性子寿命測定実験セットアップ

真空容器に収めたTPC



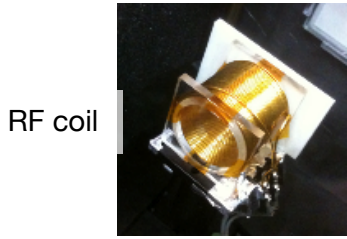
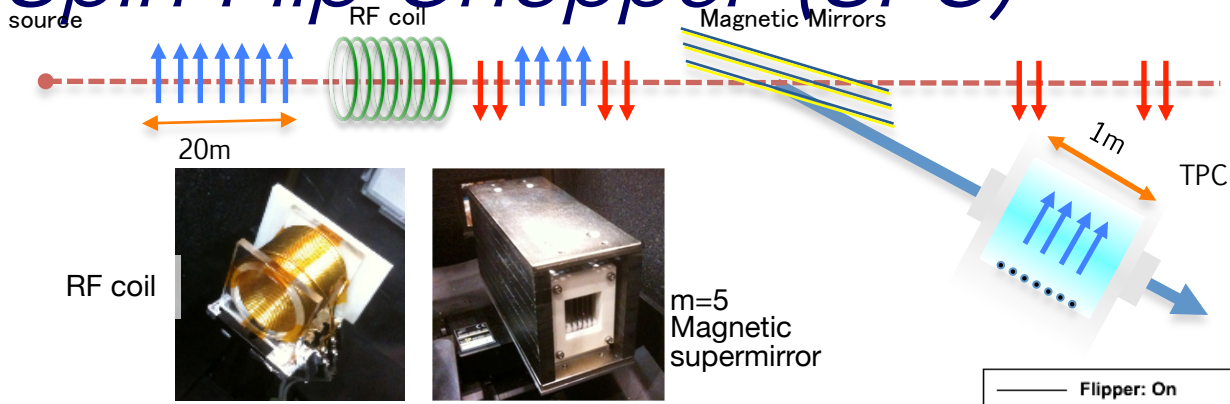
鉛シールド
(環境X線遮蔽)



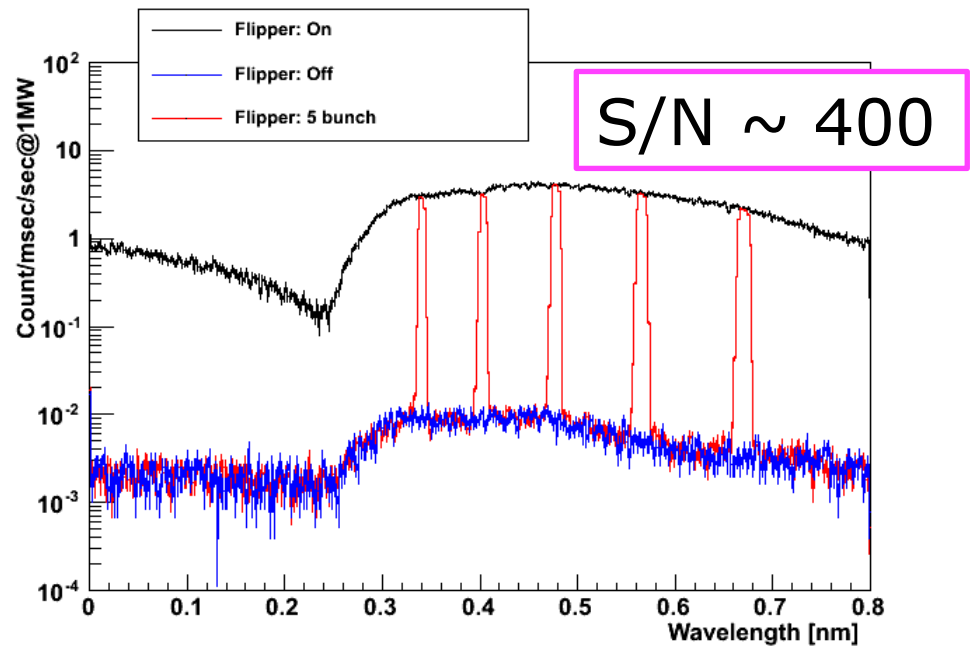
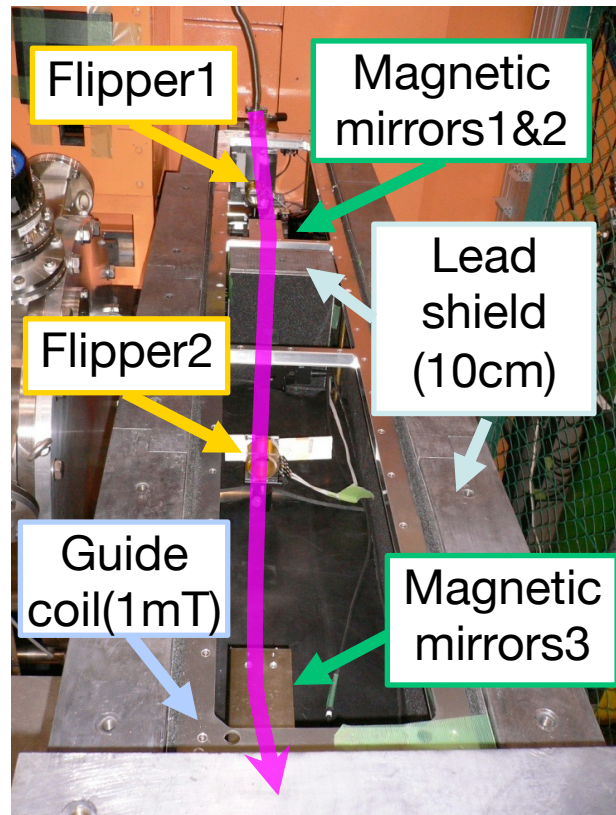
プラスチックシンチレータ
(宇宙線Veto)



Spin Flip Chopper (SFC)



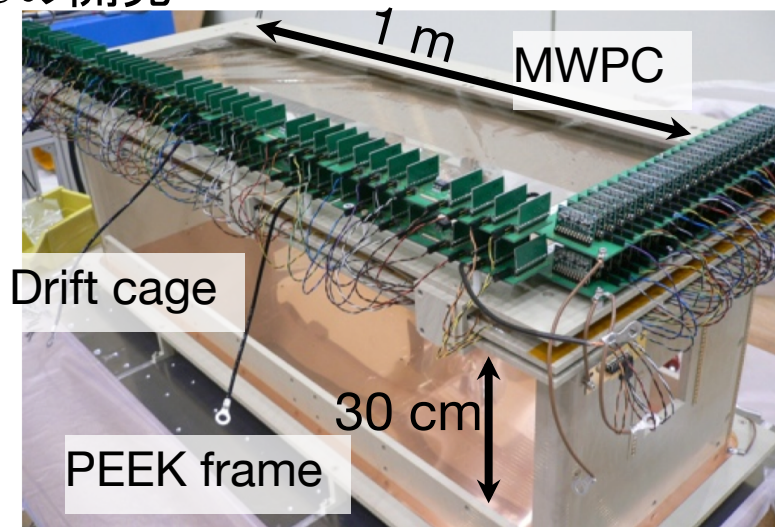
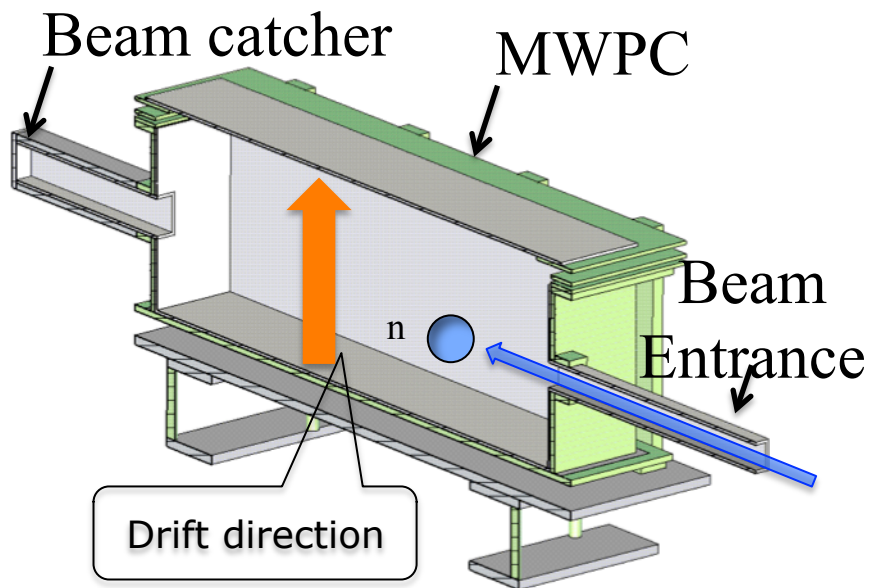
偏極中性子ビームに対し
ガイド磁場中で垂直に磁
場をかけ、丁度スピンを
180度反転する。
磁気スーパーミラーで反
射することで片方のスピン
成分のみをTPCに導く。



現在のフラックスは5つのバンチで
 1.7×10^5 neutrons/sec (MLF beam power: 300kW)
 今後より大きなSFCを開発し~18倍となる計画

Time Projection Chamber (TPC)

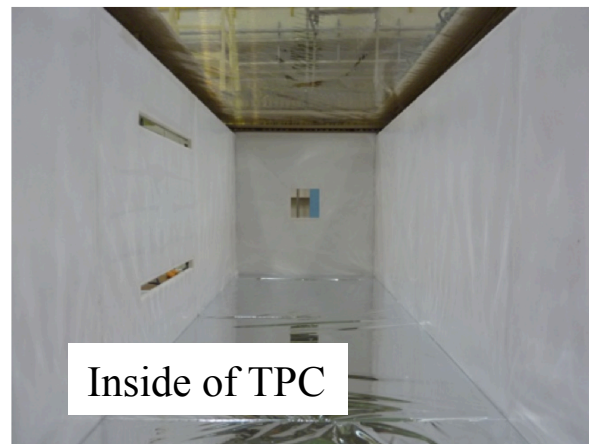
高い検出効率・低バックグラウンドTPCの開発



β 崩壊と ^3He 反応に高検出効率

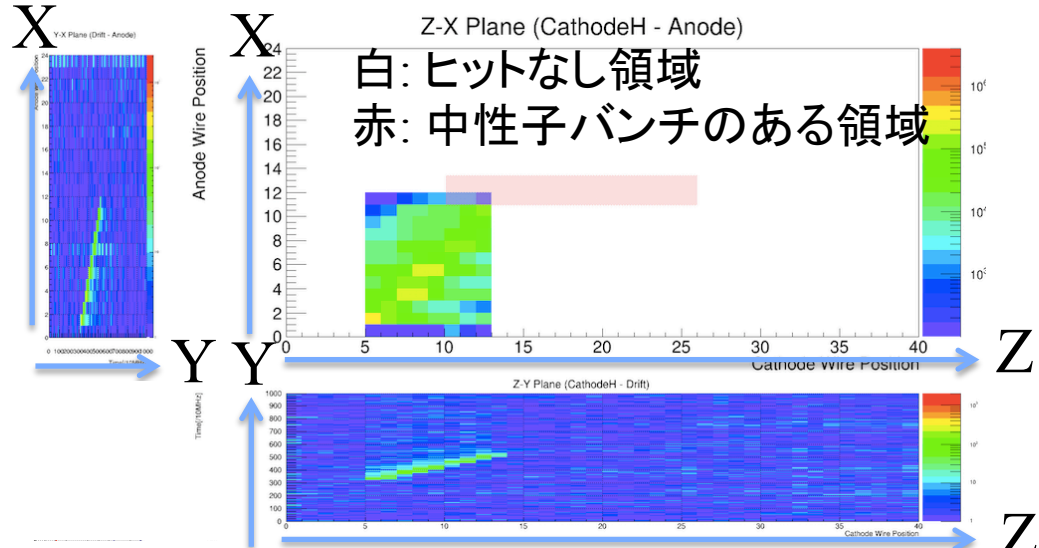
PEEK フレームと & inner ^6Li 板を利用したBG低減 S/N ~ 1:1

Anode wire	29 of W-Au wires(+1720V)
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

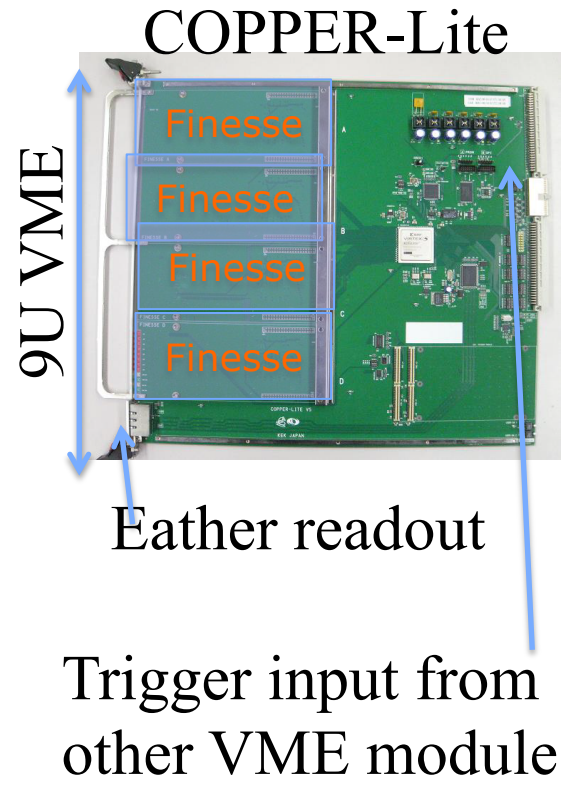


Data acquisition(DAQ)

- ハードウェアはKEKのCOPPER-Liteのシステム
- FADCでMWCPの全チャンネルの波形を取得。
- TPCのドリフト方向にトラックを引けば3方向の展開図の形でトラックを再構成が可能

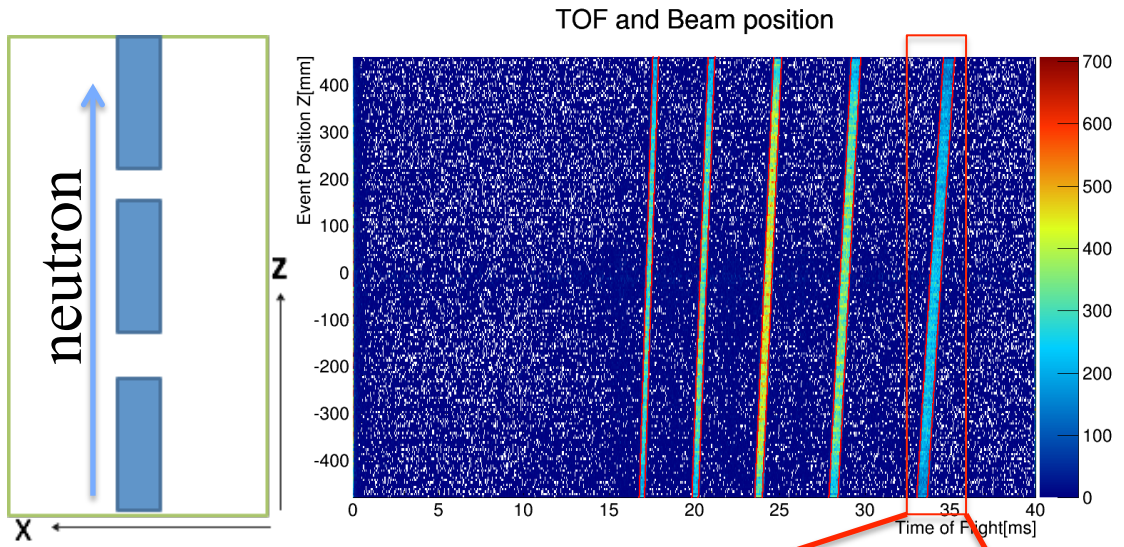


- TDCは改造を施し、Time of Flightの取得や宇宙線Veto信号の時間構造の取得などチャンネルごとに動作を振り分けて使用

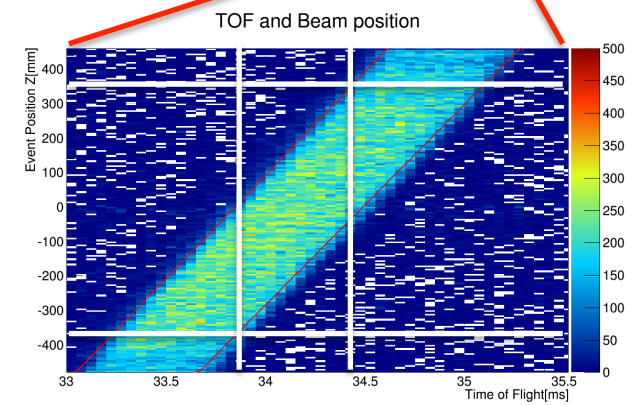


Time of Flight と中性子バンチ位置

- ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反応を選別し、Time of Flightを比較することで中性子バンチの位置を求めることができる

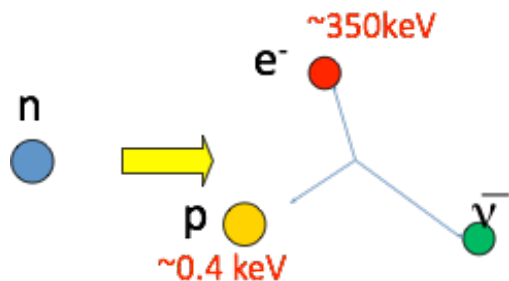


Fiducial Volumeを定義すると、そのVolume内に中性子バンチが収まっているTOFが決まる。
イベントに対してバンチ位置が決まる。



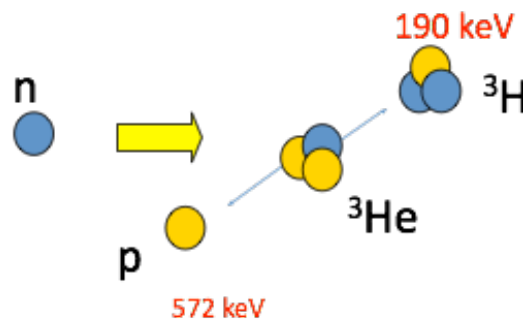
イベントの例

β崩壊



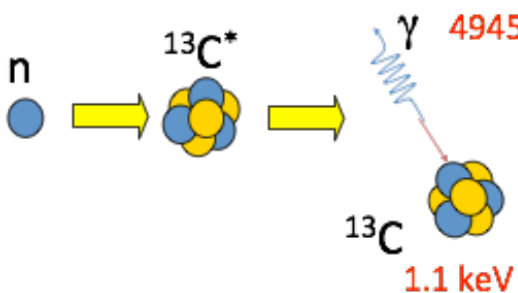
中性子バンチから発生。
 Q valueは0から782keVの連続分布。
 Energy depositは10keV程度。

$3\text{He}(n,p)3\text{H}$



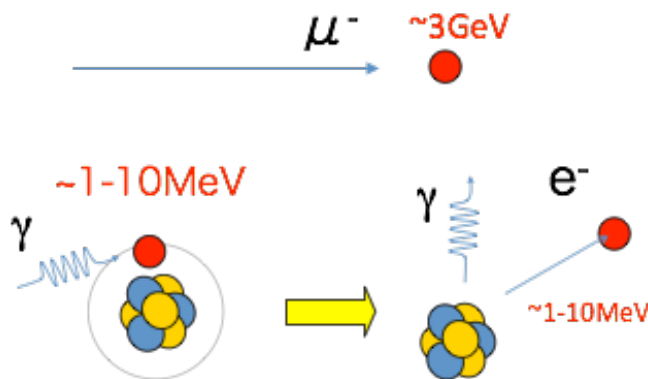
Q valueは762keV(単色)を全てTPCに落とす。
 100kPaでは飛程5cm。

$^{12}\text{C}(n, \gamma)^{13}\text{C}$ recoil



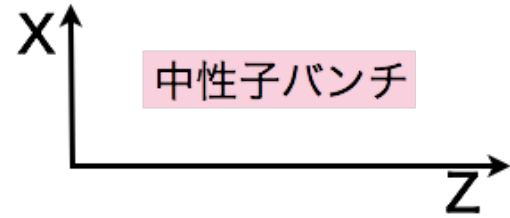
動作ガス中のCO₂による中性子捕獲後ガンマ線による¹³Cの反跳。
 1.1keVをTPCに全て落とす。

宇宙線/外来電子線

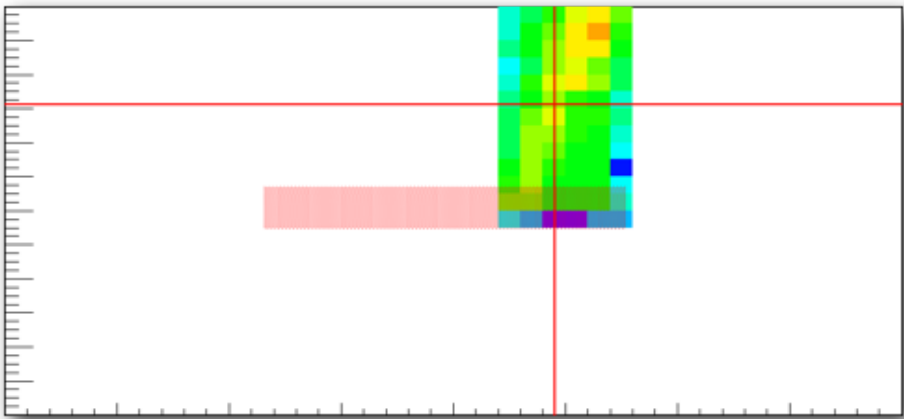


Veto仕切れなかった宇宙線やコンプトン散乱電子。TPCを貫通する。
 Energy depositは10keV程度。

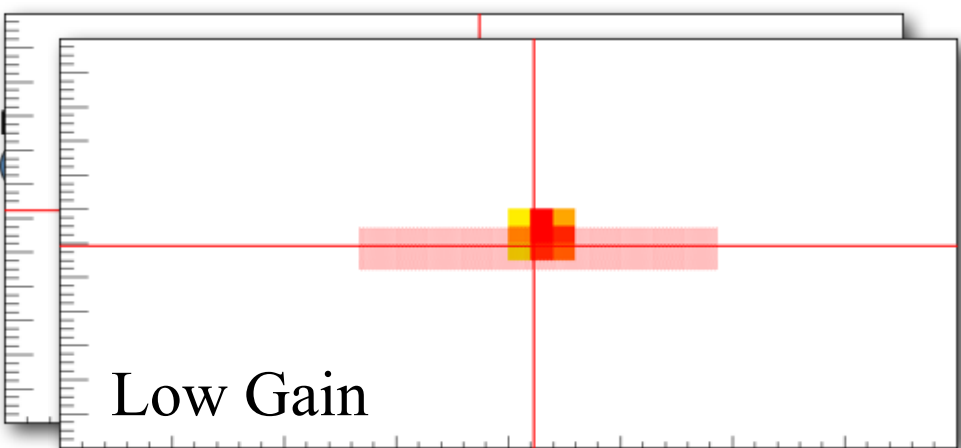
イベントの例



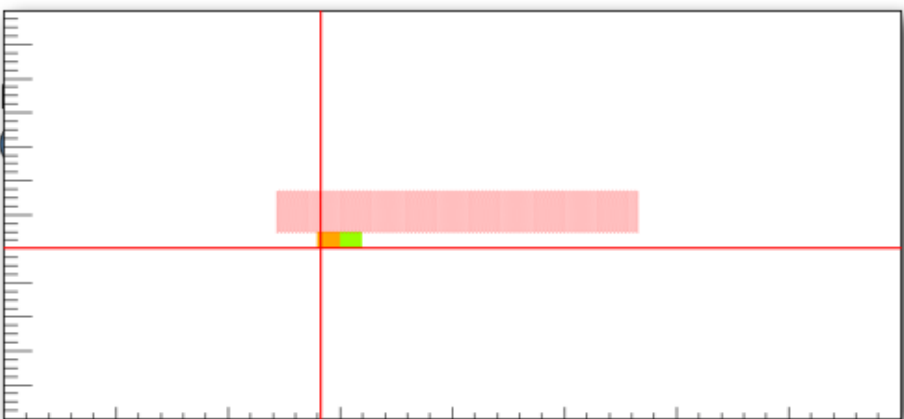
- β 崩壊



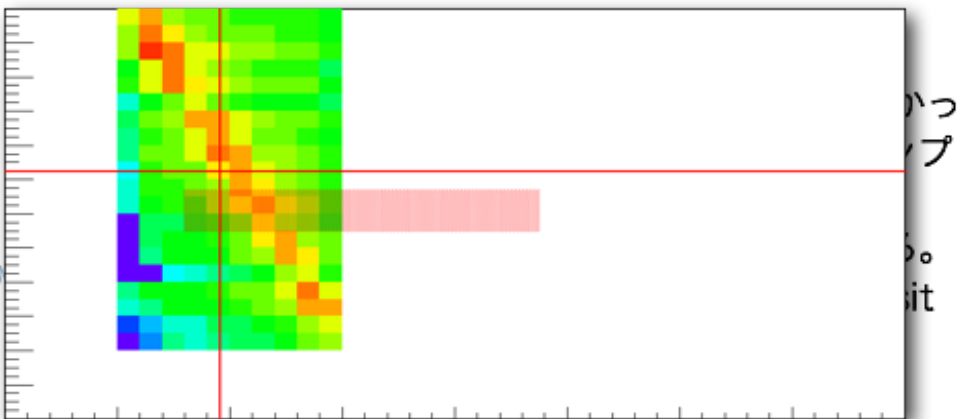
- ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$



- ${}^{12}\text{C}(n,\gamma){}^{13}\text{C}$ recoil



- 宇宙線/外来電子線



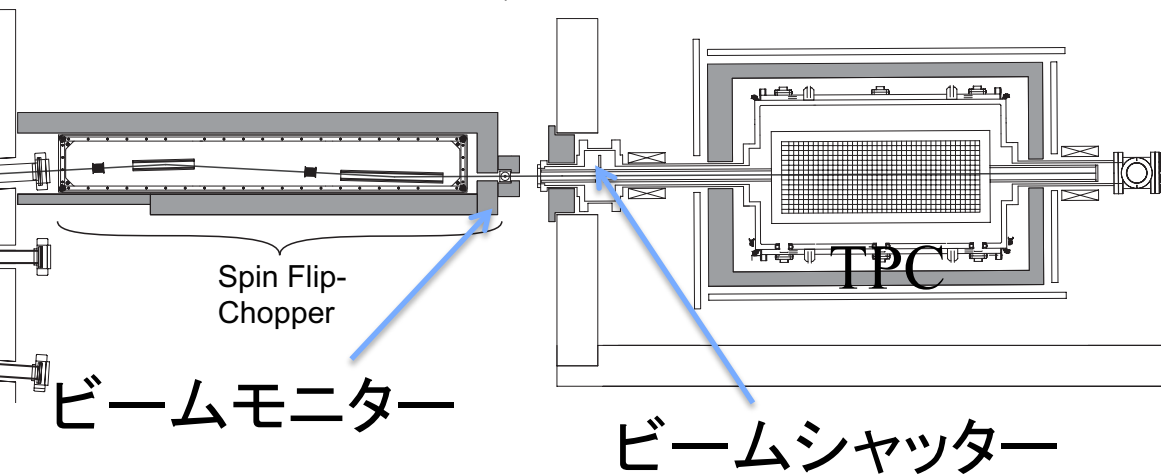
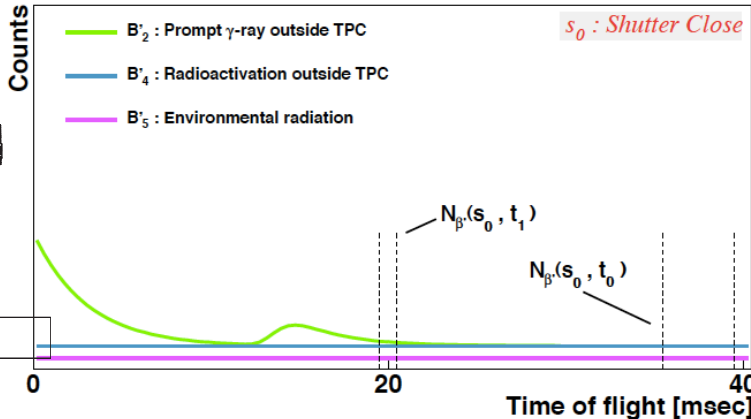
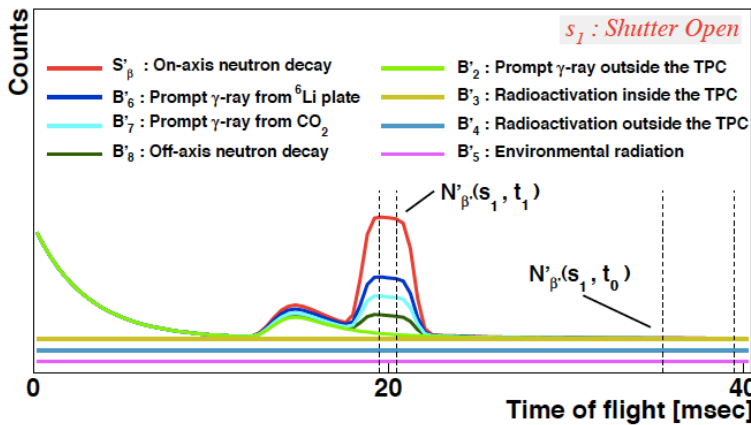
TPCのみでエネルギーとトラック情報・ dE/dx を測定が可能

バックグラウンド事象量の評価

時間に依存しない成分 / TPC外からの放射線

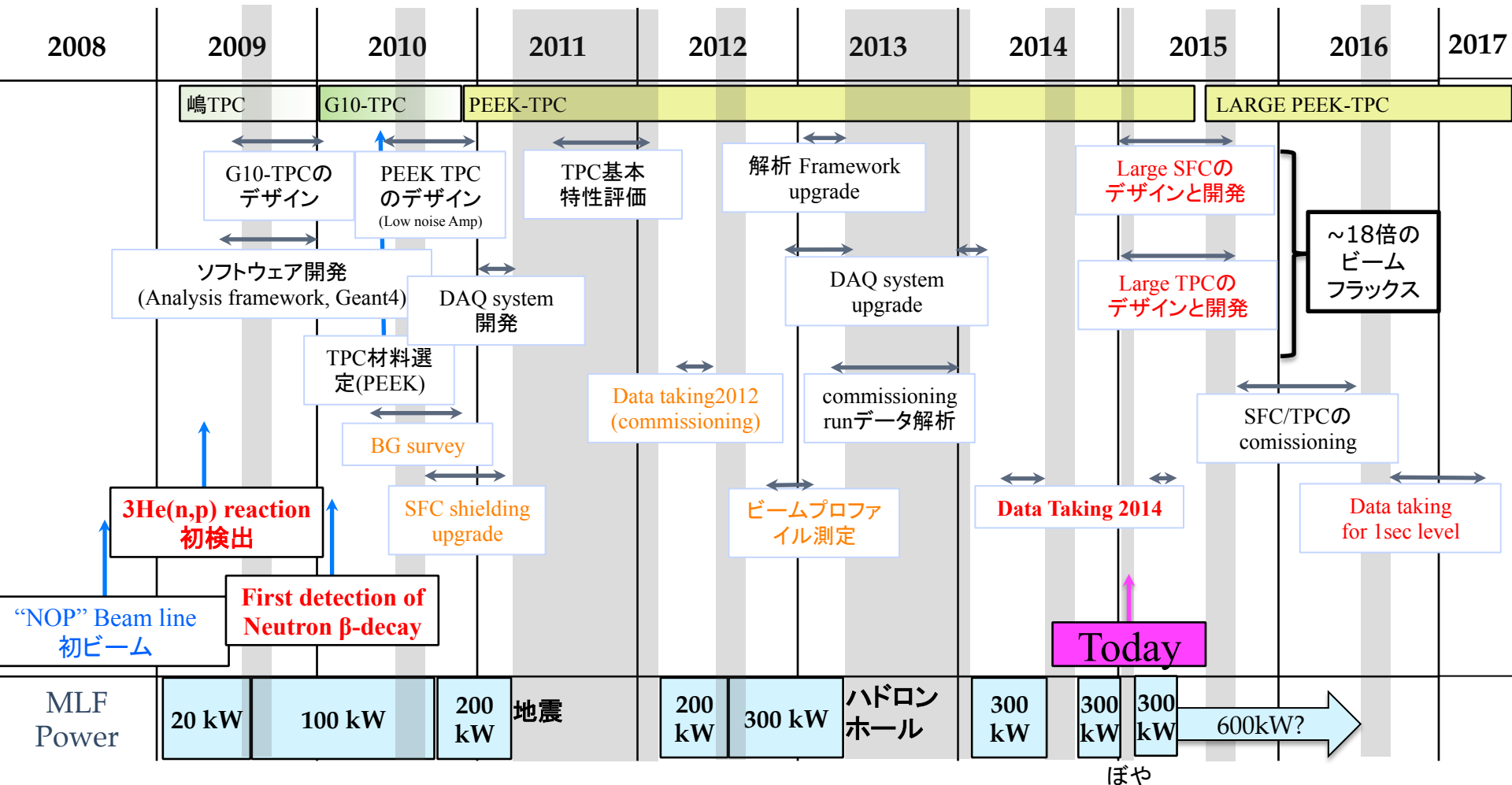
- 時間に依存しない成分: TOF
 - Environmental background
 - Cosmic rays
 - Radiation inside/outside of TPC

- TPC外: Open/Closed of ^6Li shutter
 - Prompt- γ from outside of TPC



⇒ これらとは別にTPCのガスに由来するバックグラウンドがあるが、50kPa/100kPaの別の測定で評価

これまでとこれから



2014年のデータを用いてFirst resultsを出すこと、
今後に向けて高統計のためSpin Flip Chopperの
アップグレードを計画中。

系統誤差等

	present	Future development
Stat S/N	S/N~1 stat.<10s (2week)	SFC upgrade -> S/N~20 stat <1s (30days@1MW)
^3He 密度決定	~0.5% 体積傍聴法 ~0.7% マススペクトロメータ 2つの方法の間で 2%(20sec)のずれ	よりよい圧力計(精度~0.1%)や、 マススペクトロメータの安定性向上
β 崩壊検出効率	>78%/wire >99.8% for 4 wires Correction<0.23% (2. 0s)	Development monitoring system for physics run
^3He event count (Time depend)	Correction ~2% +/- 0.2% (Preliminary)	More evacuation to suppress outgas. Check air leak.
ガス散乱	TPCでの散乱は~1-2%で、このコレクシ ョンに対してのエラーを評価中	
$^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 吸収反応断面積	J-PARCを使って我々で新たに断面積測定 実験をする計画	Better Accuracy than 0.13%

Summary

- BL05/MLF/J-PARCの“NOP” ビームラインにおいて、1秒の精度での中性子寿命精密測定を行っている
 - cf) $880.3 \pm 1.1 \text{ s}$ (PDG2014)
- 中性子寿命はCKM matrixのユニタリティの検証やBig Bang Nucleosynthesisの検証に感度がある
- 本実験はIn-flight with electronで、他の寿命測定実験であるIn-flight with protonやUCN storageとは別の測定手法となっている
- 2014年のビームタイムで数10sec程度の統計量のデータを取得
- 2015年にfirst resultを目指して解析中