

スーパーカミオカンデにおける超新星観測用DAQ の開発

森 正光

高エネルギー物理学研究室

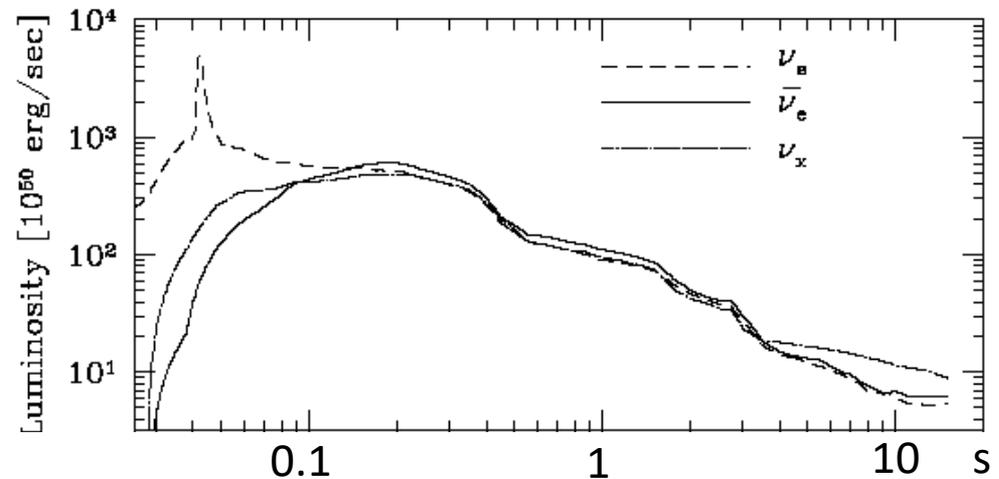
Iceppシンポジウム 24

スライドの構成

1. 超新星爆発
2. スーパーカミオカンデの概要
3. 新DAQの開発
4. まとめと展望

超新星爆発について

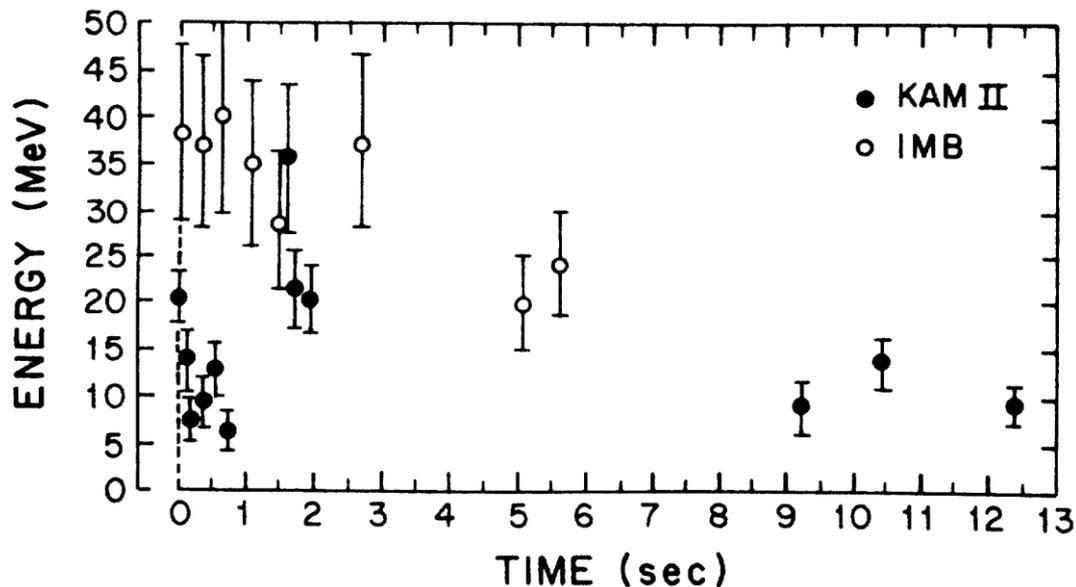
- 太陽の8倍以上の質量をもつ恒星がその生涯を終えるときに大爆発を起こす現象
- そのエネルギーの総量は 10^{53} ergに達する。
 - エネルギーの99%はニュートリノとして放出される。
- 4つの相互作用すべてがかかわる複雑な現象
- 重力崩壊モデルでは、ニュートリノが爆発には深くかかわっている。



[1] T.TOTANI "FUTURE DETECTION OF SUPERNOVA NEUTRINO BURST AND EXPLOSION MECHANISM" Astrophys J. 496, 216-215 Mar (1998)

SN1987a

- 1987年、地球から約16.7万光年離れた大マゼラン星雲で超新星爆発が観測された。
- 世界の3つの検出器で計24個のニュートリノイベントが観測された。
- 日本のカミオカンデでも11個のニュートリノイベントを観測
- これにより重力崩壊モデルが裏付けられた。



SN1987aからのニュートリノイベントのエネルギーの時間変化[2]



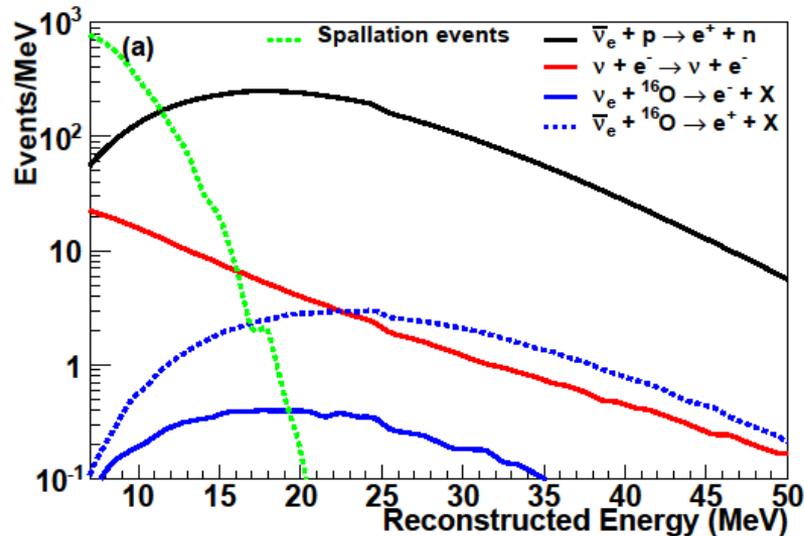
後

前

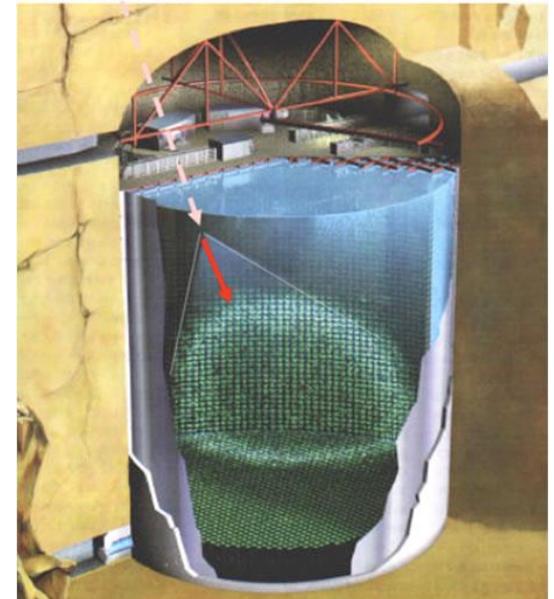
SN1987aの爆発の前後[2]

スーパーカミオカンデ

- 岐阜県神岡町にある水チェレンコフ型の検出器
 - 直径39.3 m 高さ 41.4 mのタンクに13,000本(ID:11,000 OD:2,000)のPMTがついている。
 - Fiducial Volumeは22.5 kton(カミオカンデと比べて約20倍)
- ニュートリノによる超新星爆発の観測を行っている。
- 陽子崩壊探索やニュートリノ観測を行っている。



10kpcの距離の超新星爆発からのSKで観測されるニュートリノイベントの計算[3]



SKの概観[2]

[3] SK Collaboration "Real-time supernova neutrino burst monitor at Super-Kamiokande" *Astropartphys* 81,39-48(2016)

ベテルギウス

- オリオン座に含まれる恒星の一つ
- 地球から約640光年離れている。
- 近い将来超新星爆発を起こす可能性が指摘されている。
 - ベテルギウスが超新星爆発を起こした場合のイベント数をsn1987aから見積もる。

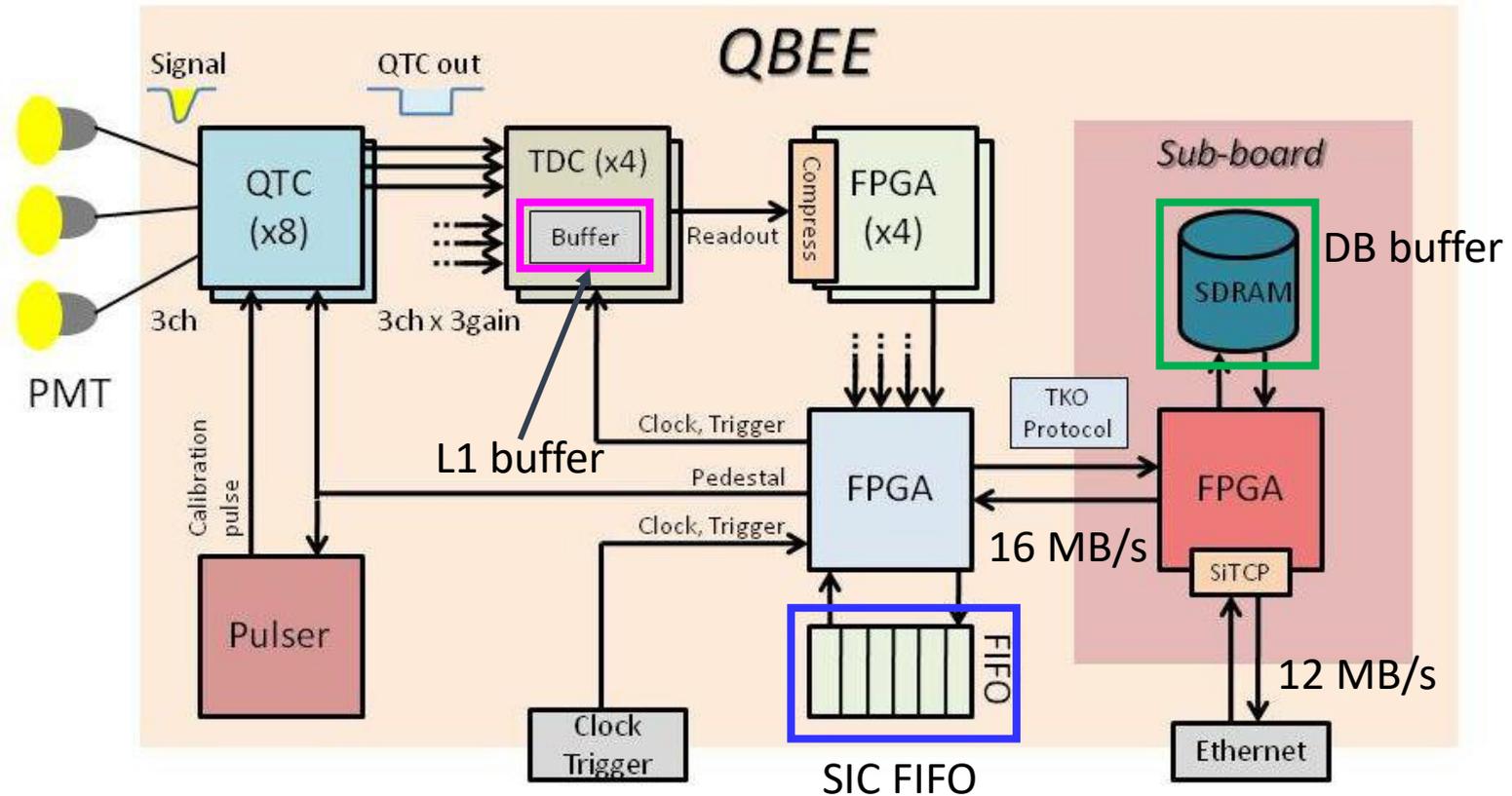
$$\underbrace{11}_{1} \text{個} \times \left(\underbrace{\frac{167000 \text{ ly}}{640 \text{ ly}}}_{2} \right)^2 \times \underbrace{20}_{3} \times \underbrace{(1 \sim 2)}_{4} \approx 30 \times 10^6 \text{個}$$

1. カミオカンデで観測されたイベント数
2. ベテルギウスとSN1987aの距離の逆2乗
3. カミオカンデとSKの体積比
4. カミオカンデとSKのPMTの被覆率の比の効果

- このイベント数が10 sで来るとするデータ量にして**40 MB/s**で**現在のDAQの処理能力を上回るデータ量**

SKのDAQ

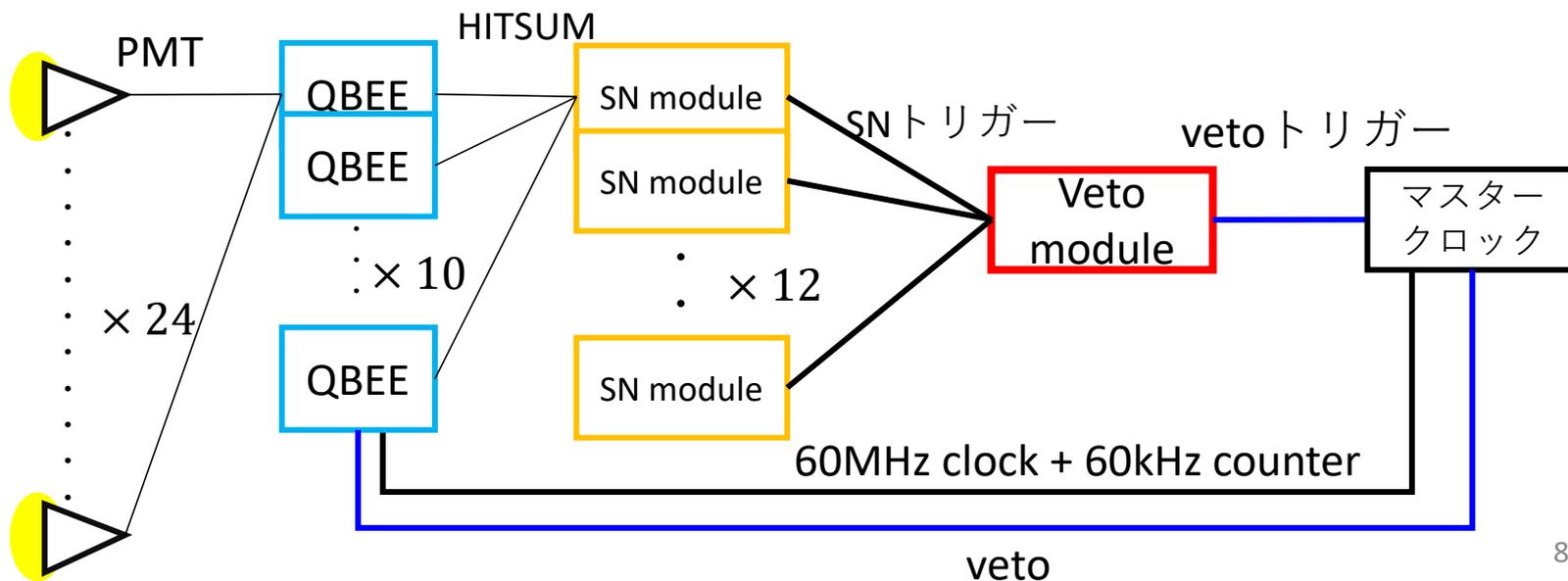
QBEEボードのブロック図



- SKでは2008年からQBEE(QTC Based Electronics with Ethernet)と呼ばれるフロントエンドボードでPMTからの信号をデジタル処理している。
- QBEEには時間のかかる処理の前にはBufferが搭載されている。
- 普段の測定ではこれらのBuffer(L1 以外)があふれることはないが超新星爆発ではBufferがオーバーフローすることが予測されている。

新DAQの概要

- QBEEのバッファオーバーフローの影響を受けない新しいDAQを開発(SN module, veto module)
- SN moduleはQBEEのHITSUMというPMTのヒット数を表す信号を読み出す。
 - HITSUMはバッファの上流にあるためオーバーフローの影響を受けない。
- SN moduleはイベントレートが高いときにSNトリガーという信号を出す。
- Veto moduleはSNトリガーの数 (0~12) を監視してSNトリガーがある基準を満たしたらveto信号をQBEEに送りQBEEのイベントを間引く。
- VetoはQBEEのTDCのみを止めHITSUM自体は引き続き使える。 **本研究の主目的**

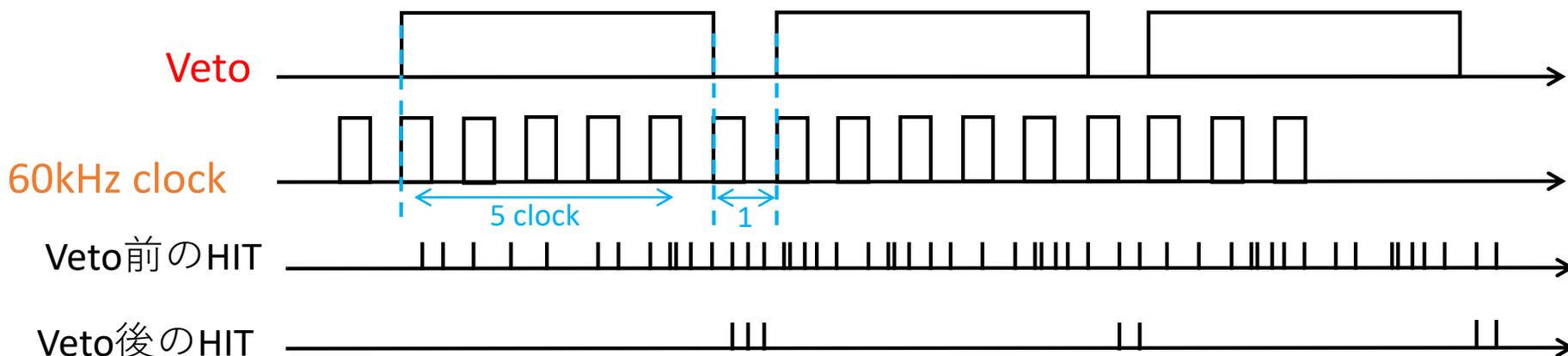


Veto module

- FPGAを用いて開発
 - シミュレーション上でファームウェアの動作確認
- Veto moduleはQBEEの負荷(\approx SNトリガーの数)に応じてvetoの長さを変える。
- Veto信号は60kHzのクロックに同期させる。
- 得られるイベントをできるだけ多くするために、veto信号のパラメータを最適化する必要がある。

決めるべきパラメータ

1. veto信号を出すSNトリガーの閾値
2. 1の閾値を何回連続で超えたらvetoを出すかの閾値
3. 2の条件も満たされた時のvetoの長さ



Veto信号の構造の例 図のveto信号は1/6にイベントを間引く ⁹

Veto moduleの外観



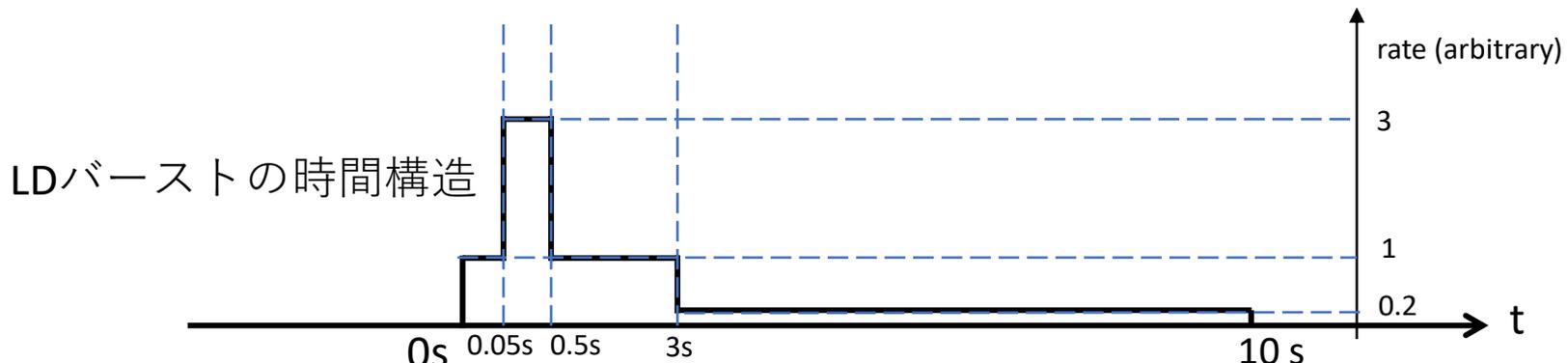
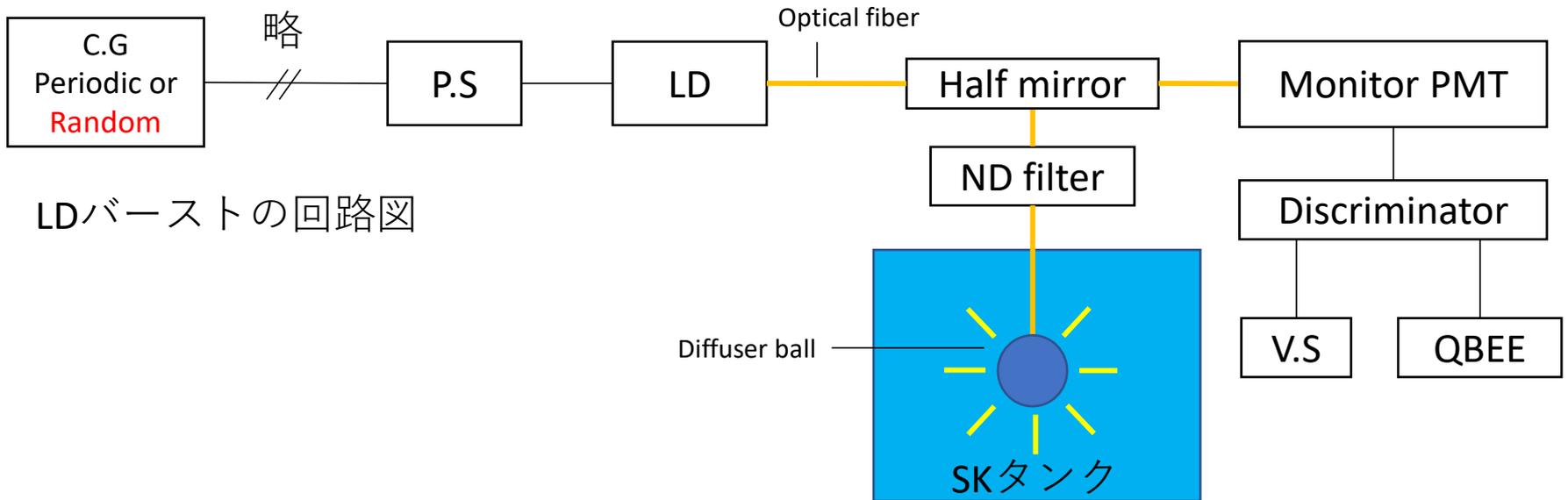
Veto moduleのボード



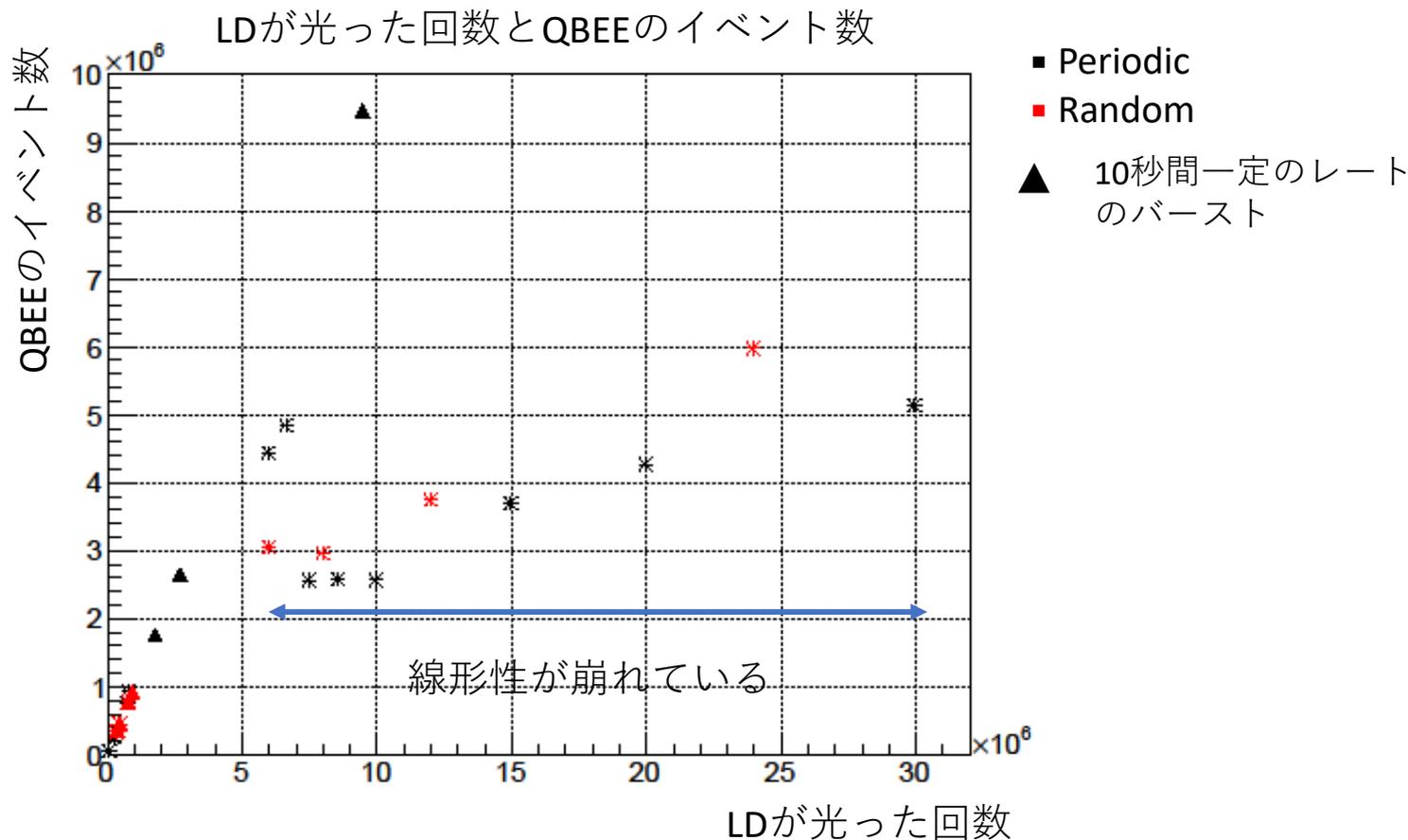
取り付けたところ

LDバーストテスト

- DAQの性能評価とvetoパラメータ決定のためにLDバーストテストを行った。
- LDバーストはタンク内でLD (Laser Diode) を光らせて疑似的に超新星爆発を再現するテスト
- 10秒間で60,000~60,000,000までのイベントを発生できる。(4 kpc ~ 150 pc相当)



QBEEでのLDバーストの観測

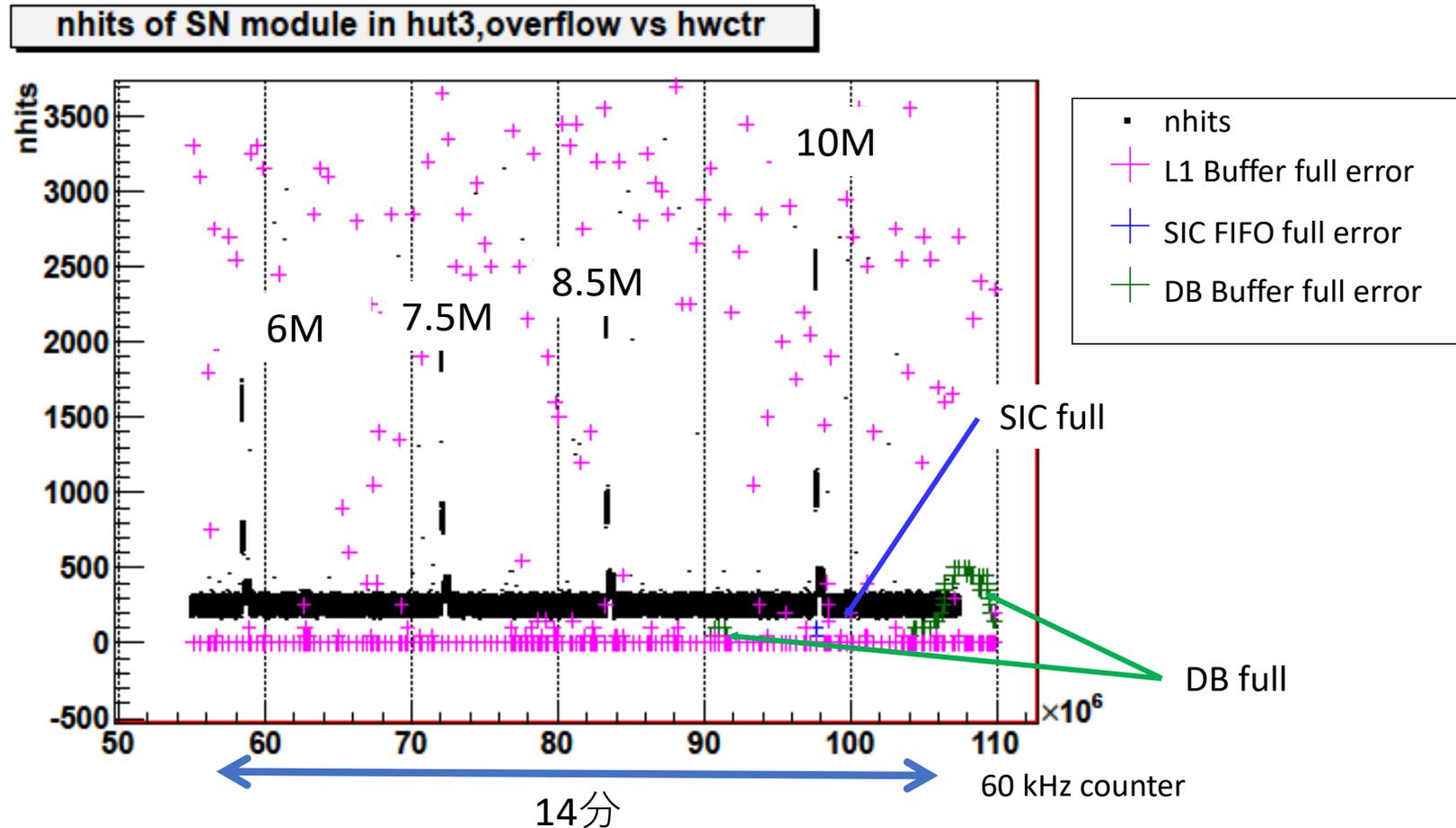


- LDが光った回数とQBEEでのイベント数をプロットすると高レートのバーストでは線形性が崩れているのが分かる。

QBEEのエラー

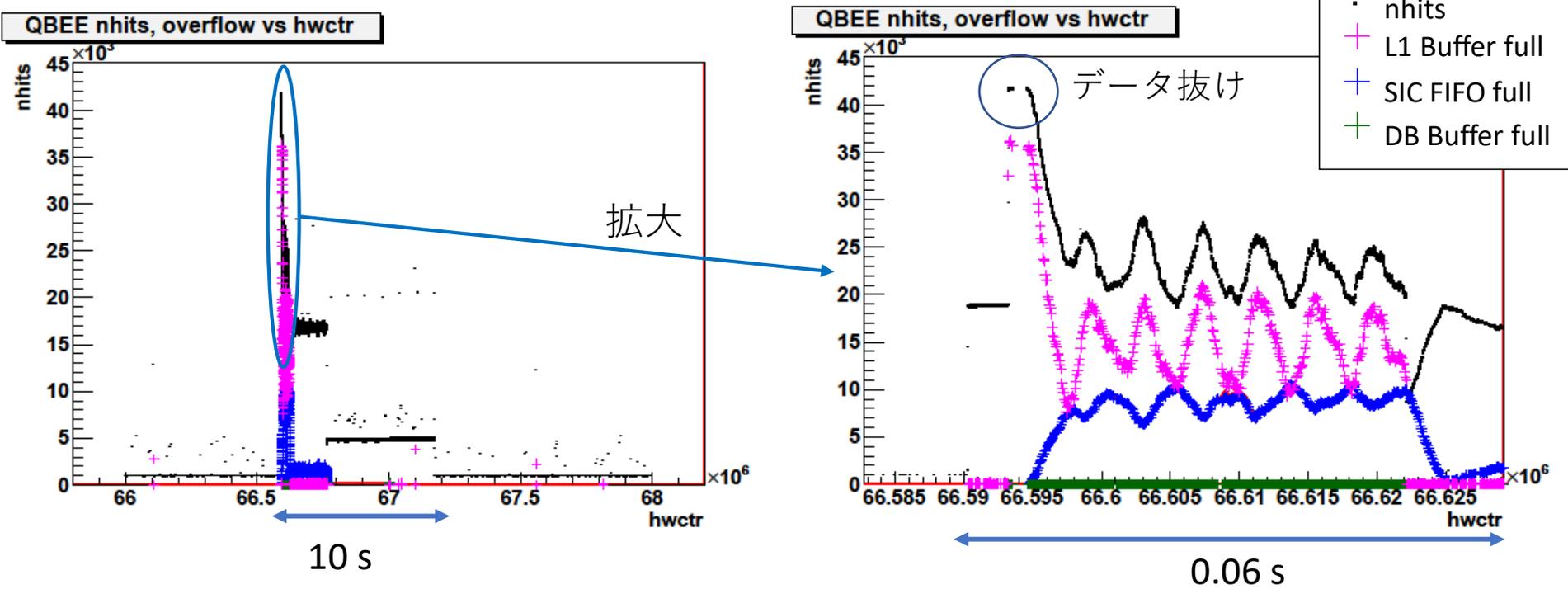
- 総イベント数6M~10Mバーストの測定
- 8.5Mイベントのバースト以上でオーバーフローによるエラーが出た。

SN moduleで記録したPMTのヒット数



- L1 Bufferはバースト関係なく短時間溢れている。
- SIC FIFOは10Mバーストで溢れている。
- DB bufferはバーストから時間がたって溢れている。

30Mバースト (ベテルギウスの超新星爆発相当)

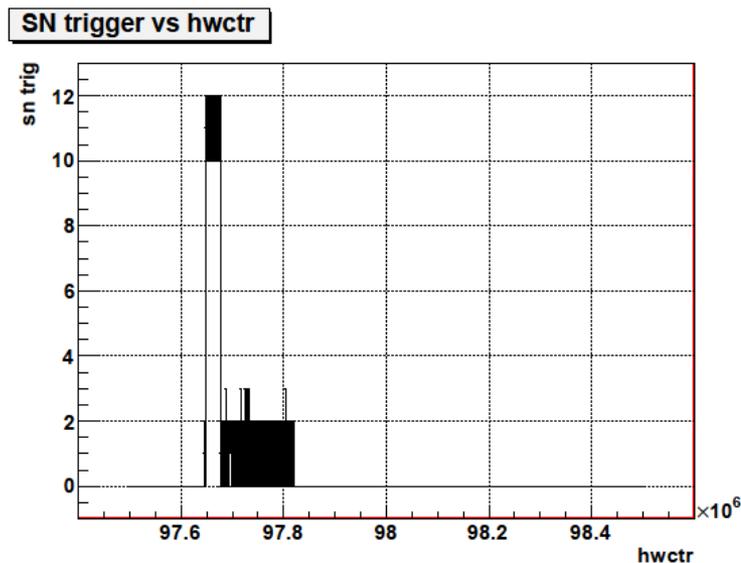


- 縦軸はQBEEで取得したPMTのヒット数
- オーバーフローによりヒット数が減衰している。
 - ヒット数が完全に抜け落ちている瞬間もある。

Veto moduleを導入してのLDバースト

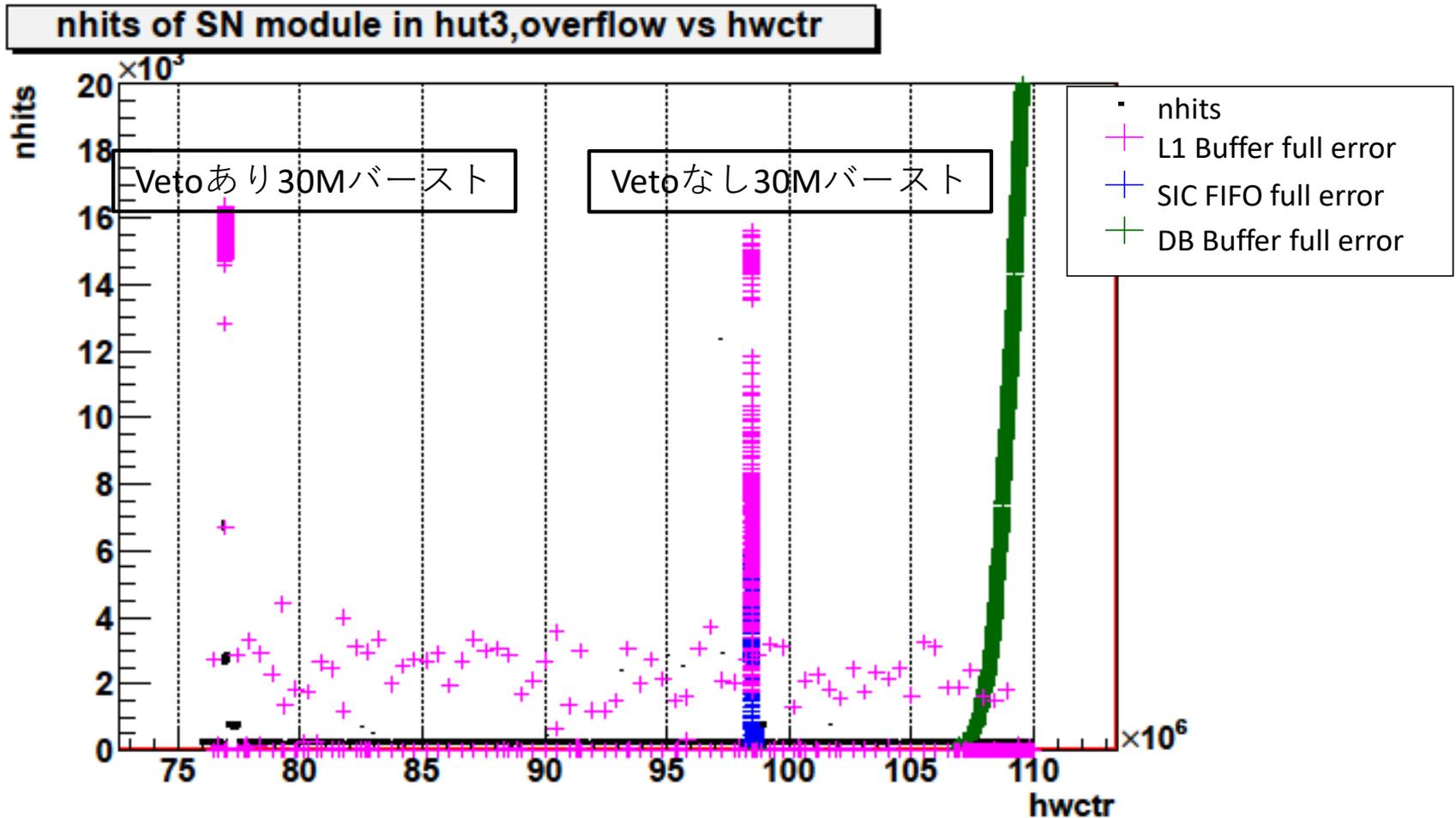
- 前述のLDバーストの結果よりveto parameterを次のように設定した。
- オーバーフローが出る閾値である8.5Mバースト程度になるようにイベントを間引く

SNトリガーの閾値 per us	間引き率
11 per 64 us	1/2
12 per 160 us	1/3
12 per 1600 us	1/4



10MバーストのSNトリガー

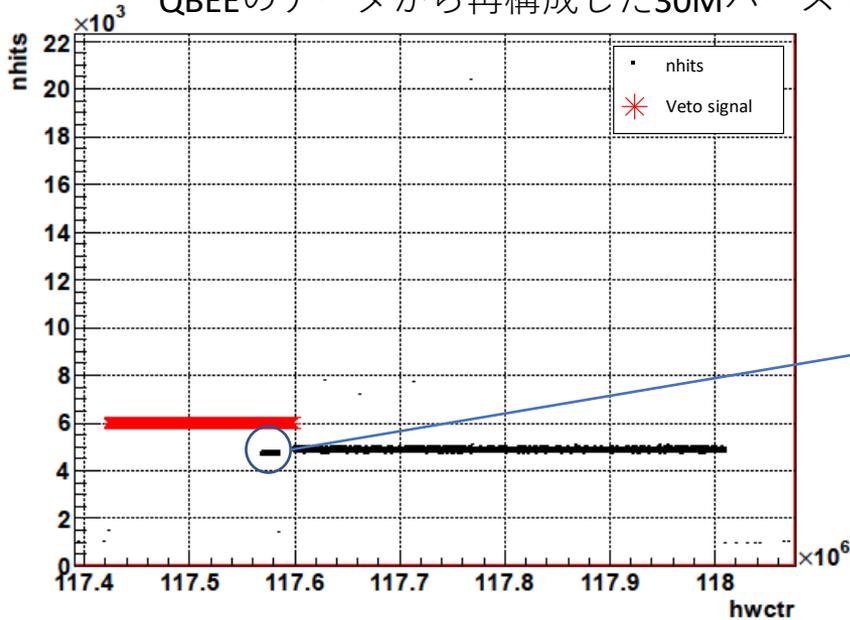
Veto moduleを入れた状態でのQBEEのエラー



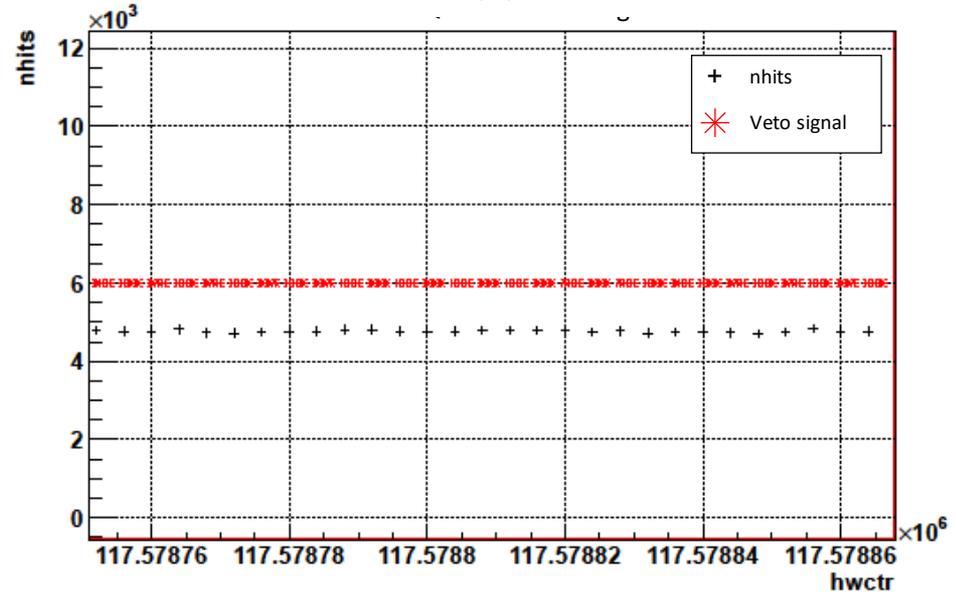
- Veto moduleを入れた方ではL1 full, SIC Full,DB fullを抑えることができた。

今後の課題

QBEEのデータから再構成した30Mバースト



拡大図



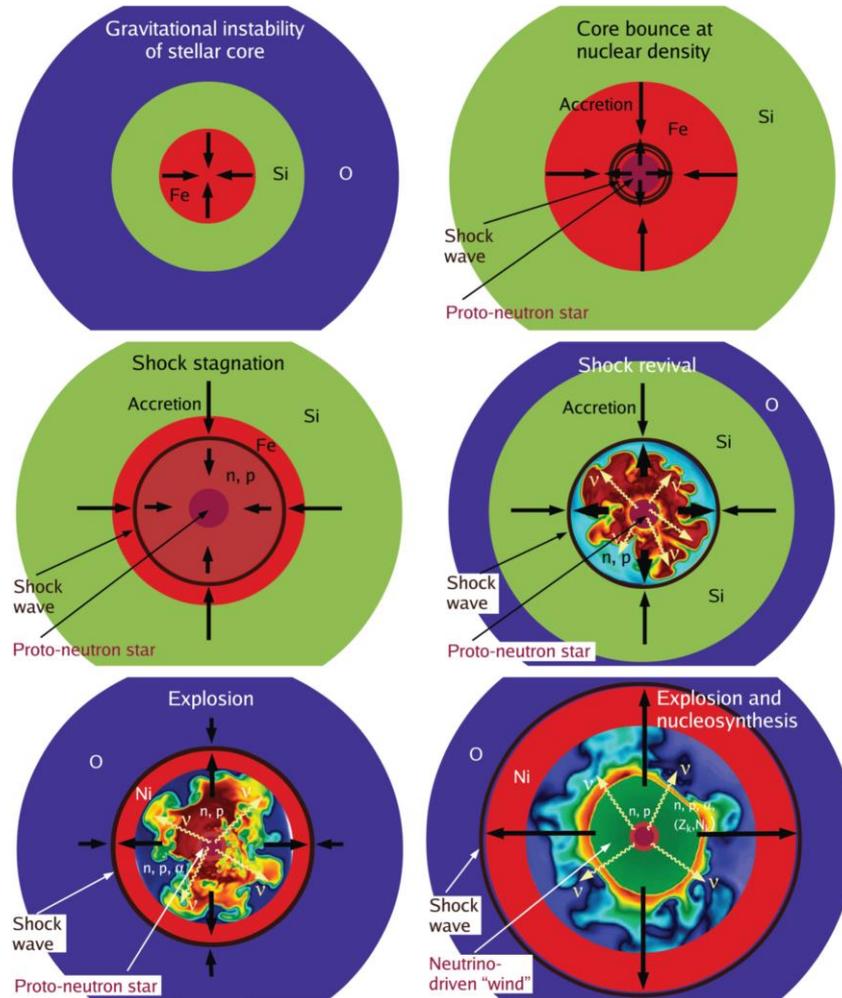
- Vetoがでたところが全くデータが取れていない。
- データが取れていたところを拡大すると、veto信号の間隔でデータが間引けていることが分かる。
- QBEEのスイッチングが間に合わなかったためであると考えられる。
 - QBEEのスイッチングの最小時間16us
 - Veto 信号の幅16us

まとめと展望

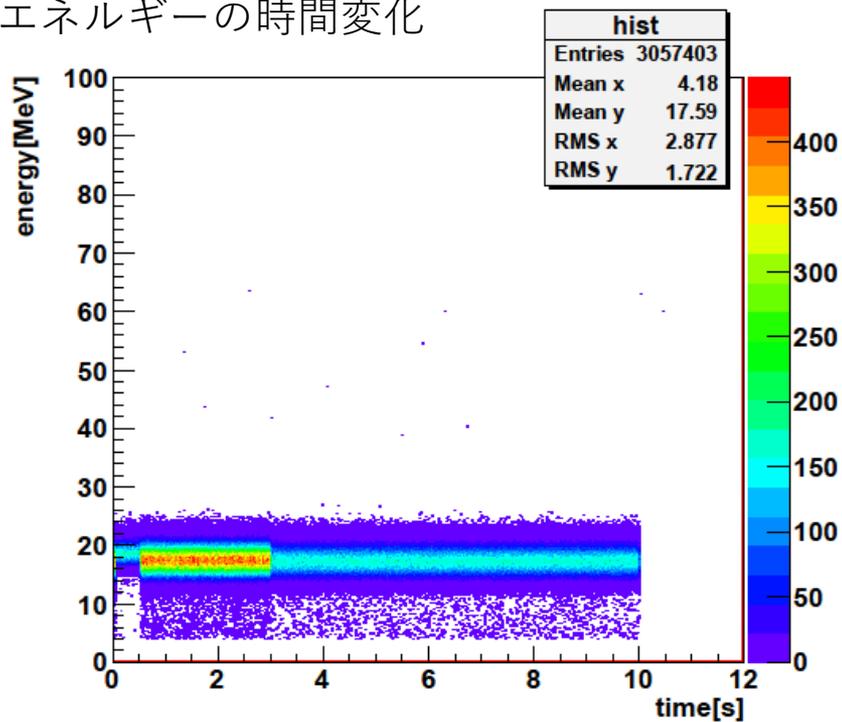
- 超新星爆発は複雑な現象でその解明のためにニュートリノでの観測が望まれている。
- SKではニュートリノでの超新星爆発観測を行っているが地球近傍で起こった場合は現行のDAQでは処理しきれない可能性がある。
- **Veto module**自体の動作確認は完了して正常に動作していることを確かめた。
- ただし**veto**信号が出たところではイベントの間引きができずにほとんど抜け落ちてしまった。
- 2月末にもう一度テストをして完成させる。

Back up

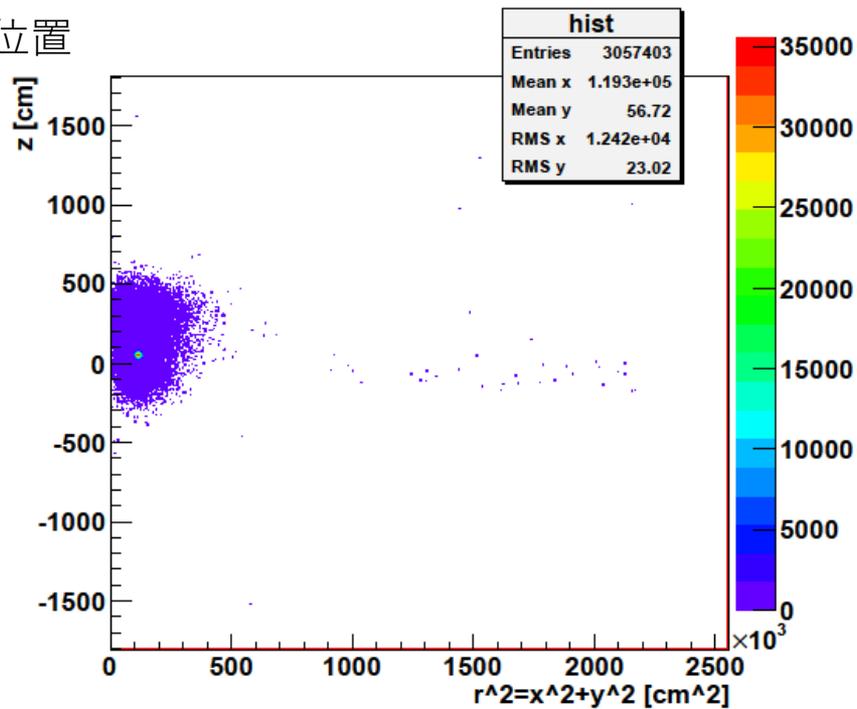
重力崩壊モデルの模式図



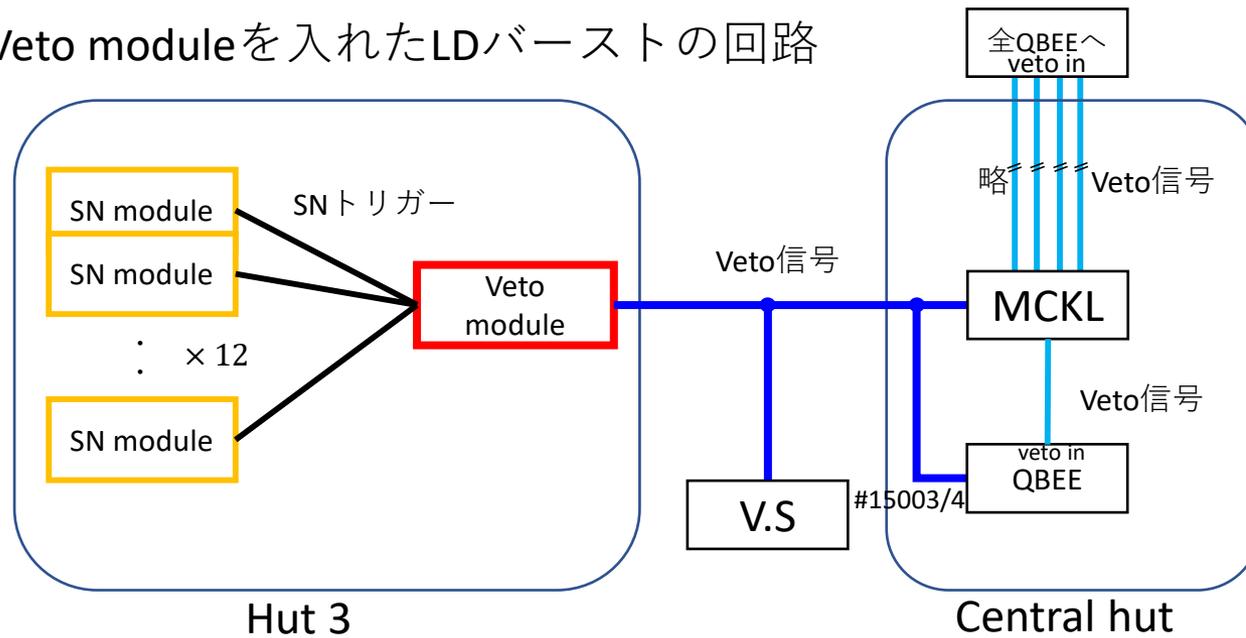
エネルギーの時間変化



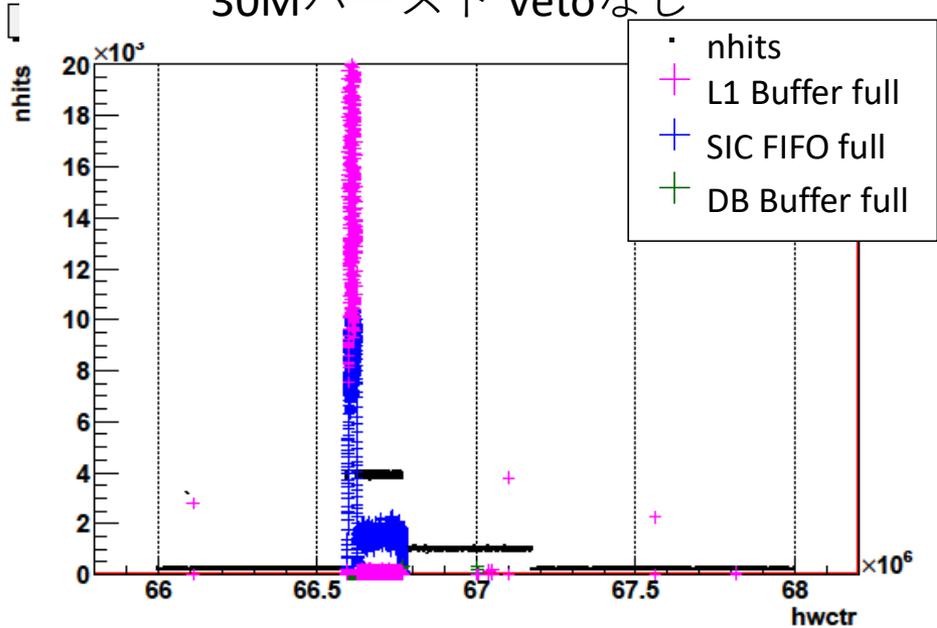
位置



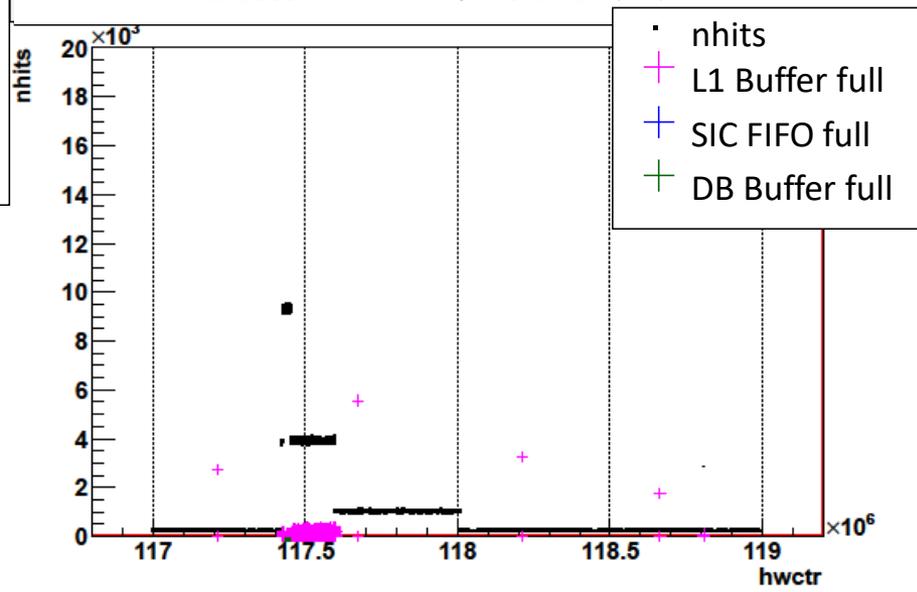
Veto moduleを入れたLDバーストの回路



30Mバースト Vetoなし



30Mバースト Vetoあり



超新星爆発探索の概要

- 現在SKはSK-IVという実験フェーズで測定している。
- SK-IVではエレクトロニクスに入れ替えなどにより感度が向上
- 2008年からのSK-IVの測定でそれ以外の期間を上回るデータがある。
- SK-IVのデータを使用しての超新星爆発探索は行われていない。

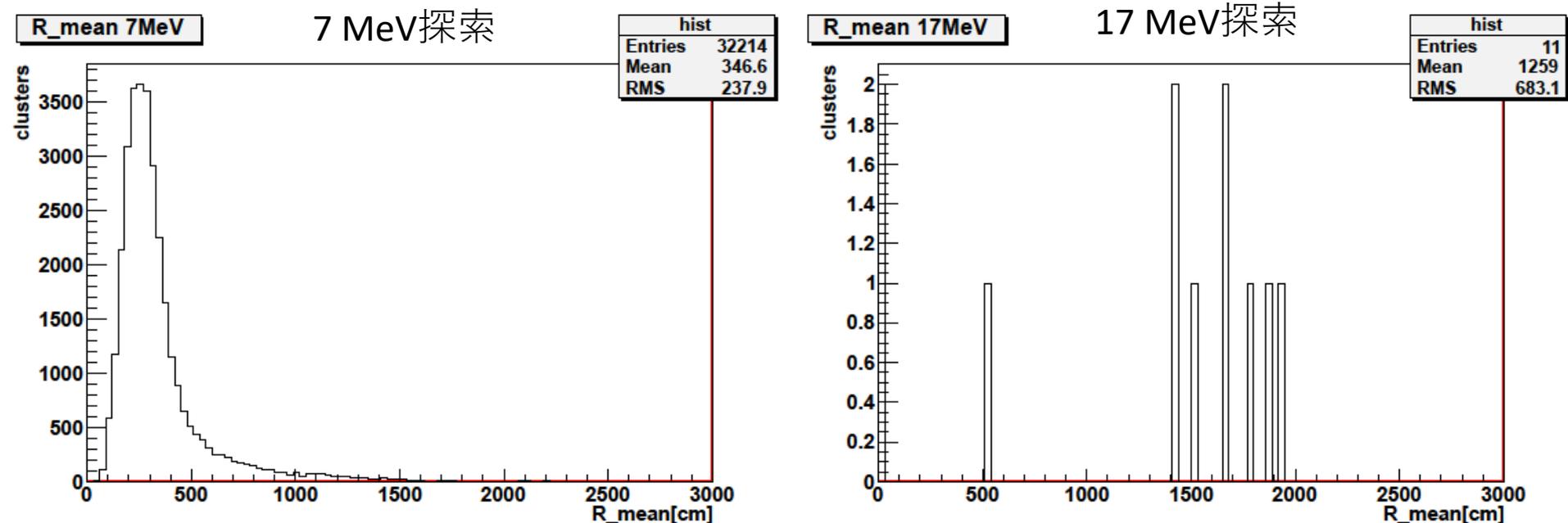
探索方法

- ある長さのtime-windowを決めその間のイベントを数え上げイベントクラスターを見つけた。

エネルギー (MeV)	> 7	> 17
総電荷 (p.e.)	< 1000	
Goodness	> 0.4	
Time-window (s) (イベント個数)	0.3 (2)	
	2.0 (3)	
	10 (4)	
探索期間	2008年9月15日~2017年8月8日	2008年9月15日~2017年8月10日

- これらの条件はMCによって決定した。
- この条件では400 kpc程度まで観測可能

結果



- 上の図は各探索で見つかったクラスターのイベント間の平均距離 R_{mean} のヒストグラム
 - MCによると典型的には1,000 cm以上になる。
- 見つかったクラスター
 - 7 MeV : 32214個
 - 17 MeV : 11個
- 今後はこれらのクラスターを詳細に解析して超新星爆発かどうかを判断する。

• 超新星爆発探索

- SK-IVのデータを使用した探索を行った。
- 条件はMCを使って決めた。
 - 使ったモデルはwilsonモデル
 - 今後さまざまなモデルを使って検証する。
- 超新星爆発の候補となるクラスターが見つかって今後は詳細に解析して超新星爆発がどうか判断する。