

スーパーカミオカンデにおける近傍 超新星爆発用データ収集システム の開発

OpenIt FPGA-PCB 2010

2011/02/16

東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒
子研究施設 横澤 孝章

共同研究者:

Y. Hayato¹, M. Ikeno², M. Nakahata¹, S. Nakayama¹, Y. Obayashi¹,
K. Okumura¹, M. Shiozawa¹, T. Uchida², S. Yamada³

1. 東京大学宇宙線研究所 神岡グループ
2. KEK素核研、Open source consortium(Open-It)
3. 東北大学 KamLAND group

目次

- 1, 近傍超新星爆発用データ収集システム開発の動機
- 2, 新システムの構成
- 3, 新モジュールの仕様
- 4, プロトタイプの実成と性能評価
- 5, 失敗談・Open-itへの要望
- 6, まとめと今後の予定

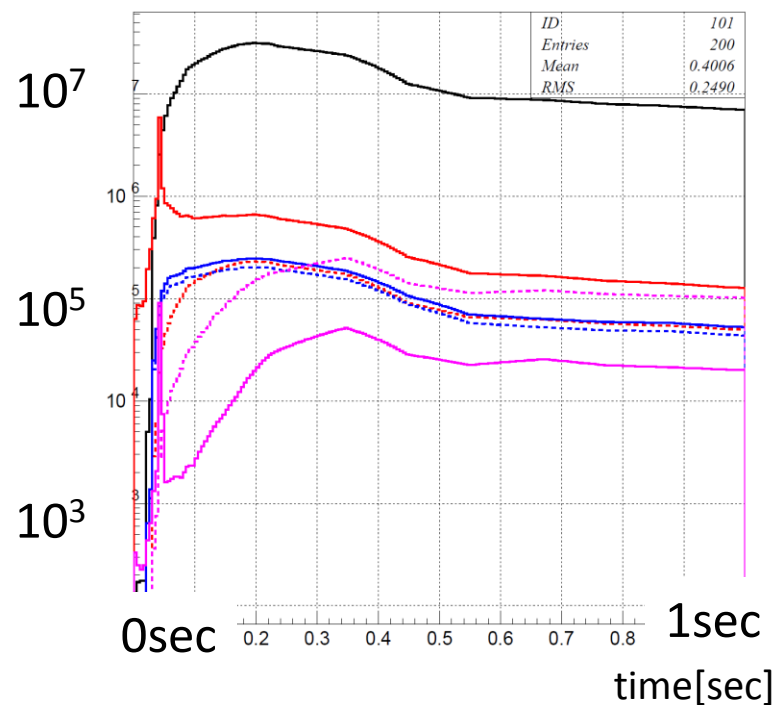
1, 近傍超新星爆発用データ収集システム開発の動機(1)

2009年6月、ベテルギウスが15年間で15%縮小しているというニュースが発表された。ベテルギウスやアンタレスというような地球から近い距離の星(約500光年)で超新星爆発が起こった場合、超新星爆発シミュレーションより**最大イベントレートは約30MHzにのぼる。**

現在のSKのDAQシステムでは6MHz程度まではデータ取得可能だが、それ以上になるとonline DAQやfront-end electronicsのデータ処理が遅れデータの取りこぼしが起こってしまう。

貴重な近傍超新星からのデータを取りこぼしなく取得するために、イベントレートに依存しない新たなシステムの開発が必要である。

SN event rate[Hz]



- $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$
- $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$
- $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$
- $\nu_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^- + {}^{16}\text{F}$

1, 近傍超新星爆発用データ収集システム開発の動機(2)

近傍超新星爆発に対する対応(1)

High event rateを検知して、データを均等に間引いてデータ量を減らしてやる。→現在 test中

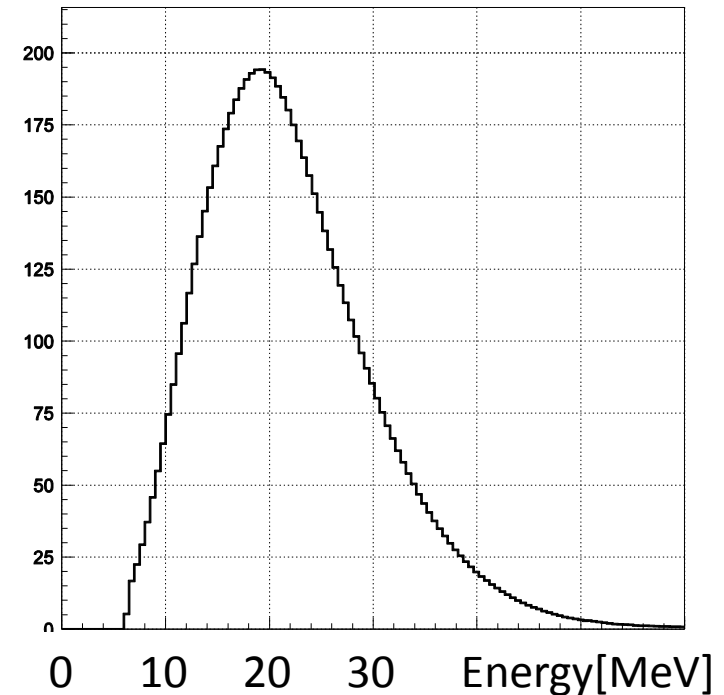
近傍超新星爆発に対する対応(2)

現行のDAQシステムと独立に、あらたに超新星爆発ニュートリノイベントに関するデータを收拾するバックアップシステムを開発する。
→ this talk

システムはevent rateによらず安定稼動が要求される。
Event rateによってデータ量が増加しないことが望ましい。

→よって保存するデータとして**単位時間辺りのSK検出器のPMTのヒット数の合計**を選択した。

この情報だけでも、超新星爆発からのニュートリノのエネルギー一流束(ニュートリノ強度 x エネルギー)の時間発展を捕らえることができる。



SKで観測される超新星爆発イベントのエネルギー分布(シミュレーション)

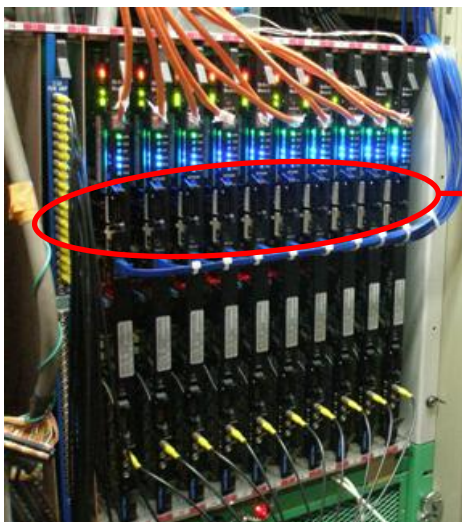
2, 新システムの構成

2-1, 入力信号

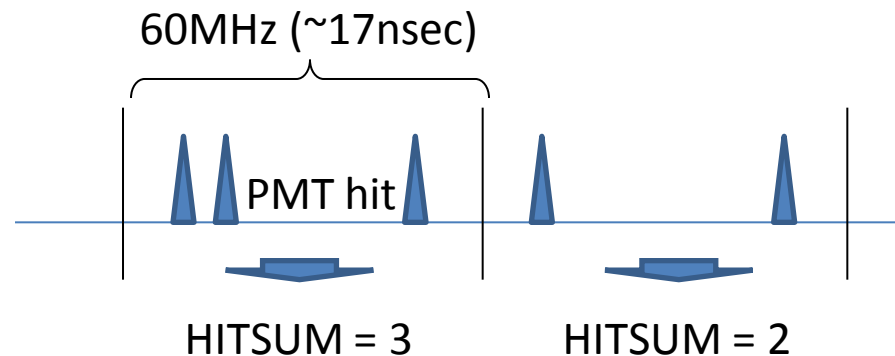
PMTからのヒット数はQBeeからデジタル信号として常に発信されている。Digital HITSUM信号は、1枚のQBeeボードにおけるPMTのヒット数を60MHzでだし続けている信号で、LVDSレベルである。

一つのQBeeボードで24のPMT信号を処理しているためDigital HITSUM信号は、0-24の値を持つ。

このDigital HITSUMは、下流のonline DAQシステムがhigh event rateにより処理が遅延しても影響を受けない → 現行DAQシステムとは独立に安定して稼働させることができる。

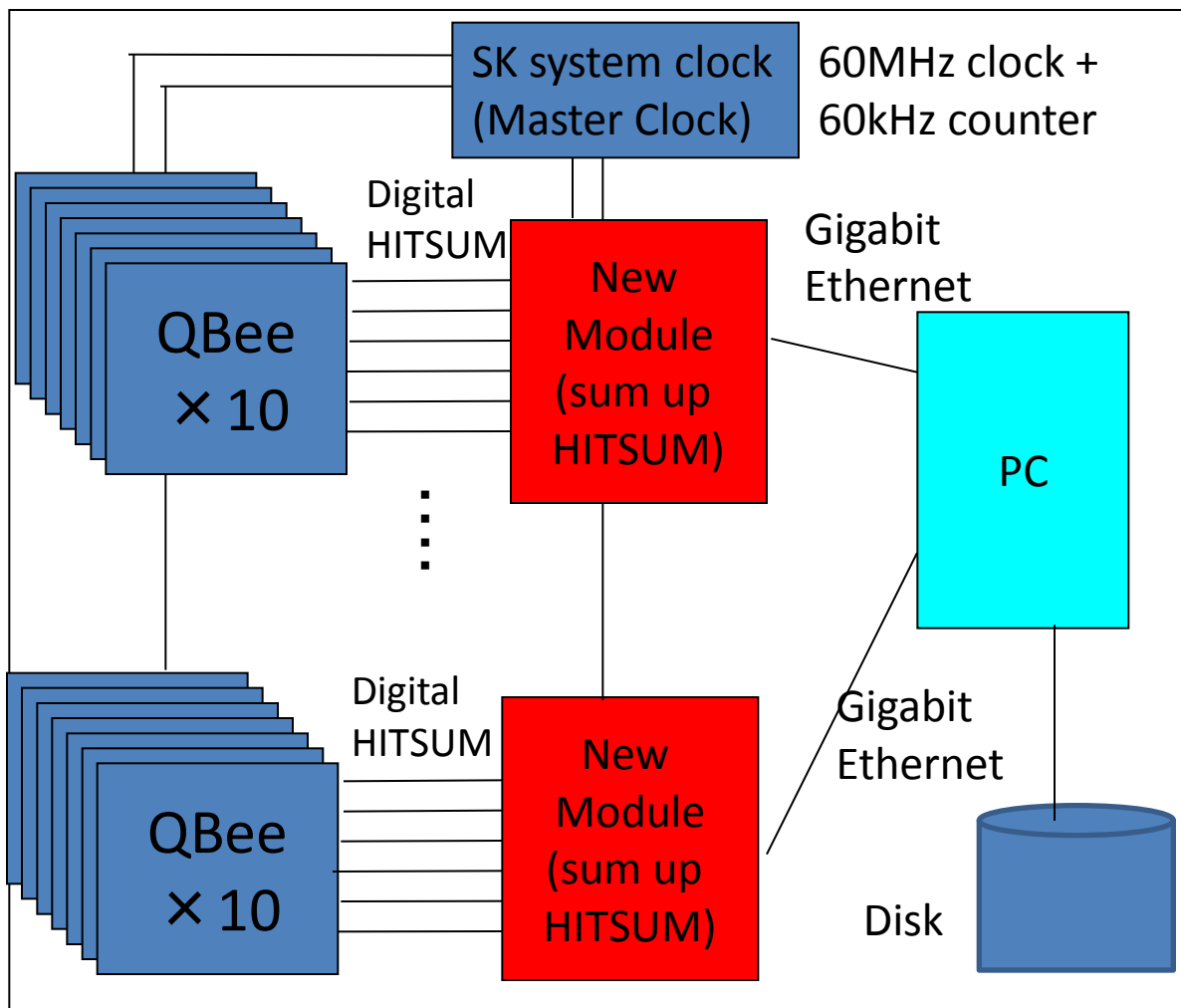


Digital
HITSUM



2, 新システムの構成

2-2, 新システムのブロック図



現在SKでは約500枚のQBeeが稼働している。

新モジュールのシステムクロックに、SK DAQで用いているシステムクロック(Master Clock)を使用する。

10枚分のQBeeからのdigital HITSUM信号の足し上げを予定している。

各モジュールでの足し上げ後、Gigabit EthernetにてPCに送られ足し上げ、ディスクに保存する。

3, 新モジュールの仕様

3-1, 時間分解能の評価

Digital HITSUMの信号が60MHzで来ているため60MHzでデータを保存したいが、データ量が膨大になってしまう。

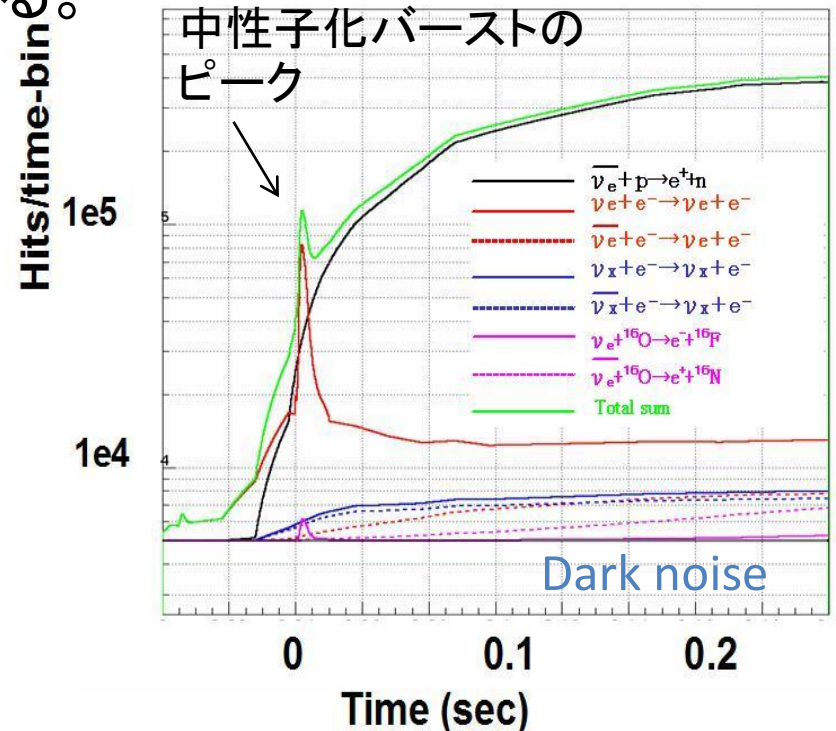
- 60MHz時間分解能で保存すると,498,000[GB/day]となる。
- ちなみに現行のSK DAQ では ~720[GB/day]程度である。
- **時間分解能を落として保存データ量を抑える必要がある。**
 - どの程度まで落としても物理的に意味のあるデータとなるか？
 - このシステムの主なバックグラウンドであるPMTのダークノイズ4,500[Hz/1PMT]のふらつきにイベントが埋もれない必要がある。
 - どの程度まで落としたりディスク保存が可能か？
~100[GB/day]オーダーまで落とすことができれば、保存が容易となる。

3, 新モジュールの仕様

3-2, PMT dark noise の影響

超新星爆発ニュートリノのイベントでは120[hits/event]のPMTがヒットすることが期待される。この数字と各時間分解能におけるダークノイズのふらつきを比べる。

Time resolution [MHz]	Fluctuation of dark noise [hit/time bin]
60	±0.83
0.1	±22
0.06	±26
0.01	±71



データ量(~500[GB/day])とダークノイズのふらつきより、**0.06[MHz]**時間分解能が物理的な意味を失わず最適であると判断した。

距離500ly (Betelgeuse)で超新星爆発が起こった際のヒット数の時間構造。

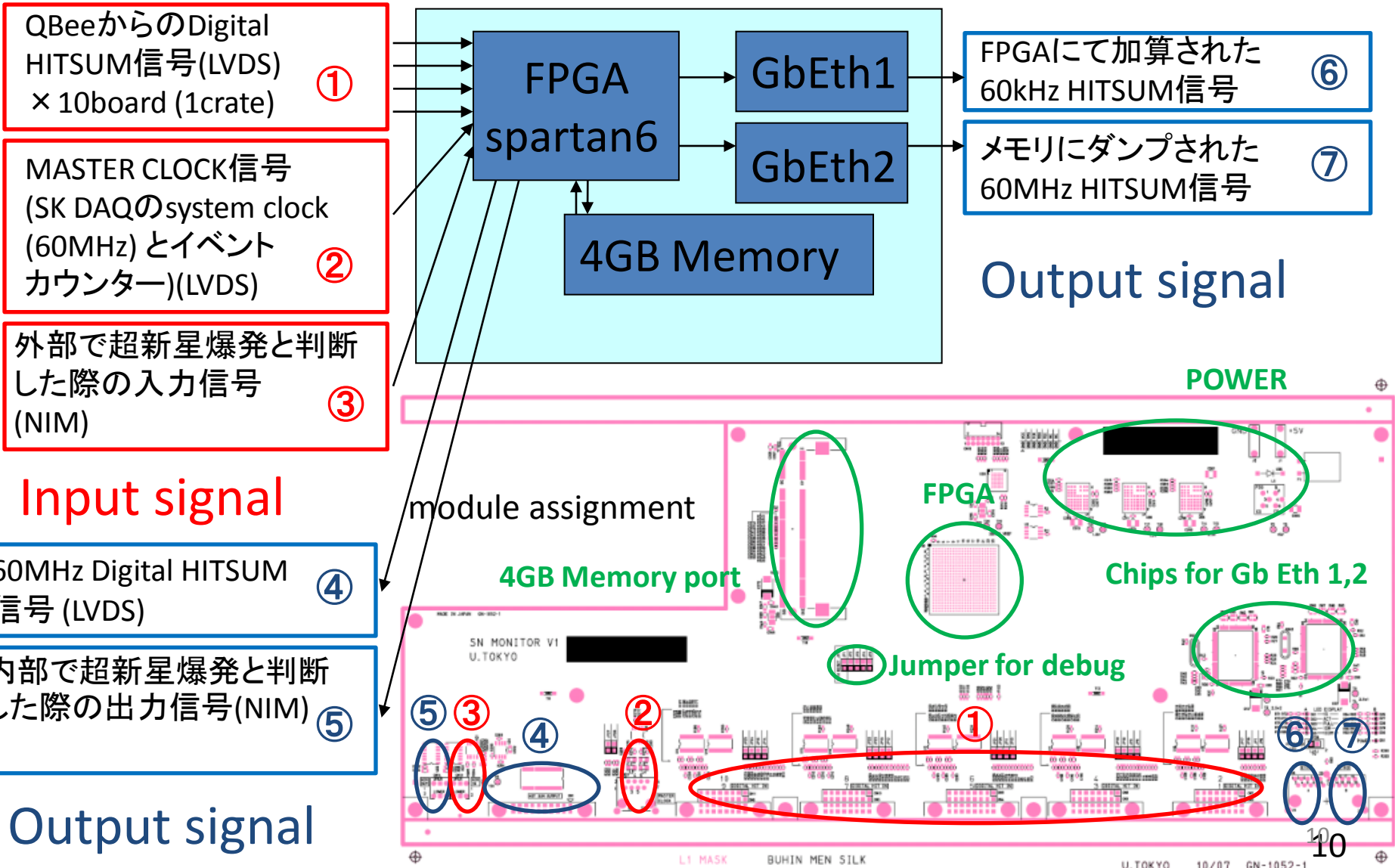
3, 新モジュールの仕様

3-3, 近傍超新星爆発感知およびデータダンプ機能

- ・超新星爆発らしきイベント群が来た際に信号を出す。
このモジュールにて超新星爆発と判断した際に、ダンプシステムのトリガー、QBeeのpre-scalingのために信号を出すようにする
- ・超新星爆発らしきイベント群に対するメモリへのダンプシステム
0.06MHzにてヒット情報を常に保存するとしたが、超新星爆発らしきイベント群に対しては本来の60MHzにてデータを保存したい。
そのために、基板上に4GBのメモリを設置し、モジュール内部もしくは外部にて超新星爆発らしきイベント群と判別された際、メモリに60秒分のヒット情報を60MHzで保存できるようなシステムを付随することを予定している。
メモリからのデータ出力は別口のGigabit Ethernetを設置する。

3, 新モジュールの仕様

3-4, 新モジュールのブロック図



4, プロトタイプの作成と性能評価

4-1, 新モジュールのブロック図

2010年9月にプロトタイプボードが完成し、各ポートの性能評価を行った。

~40cm (within 19inch rack)



Prototype board

4GB Memory port

Jumper for debug

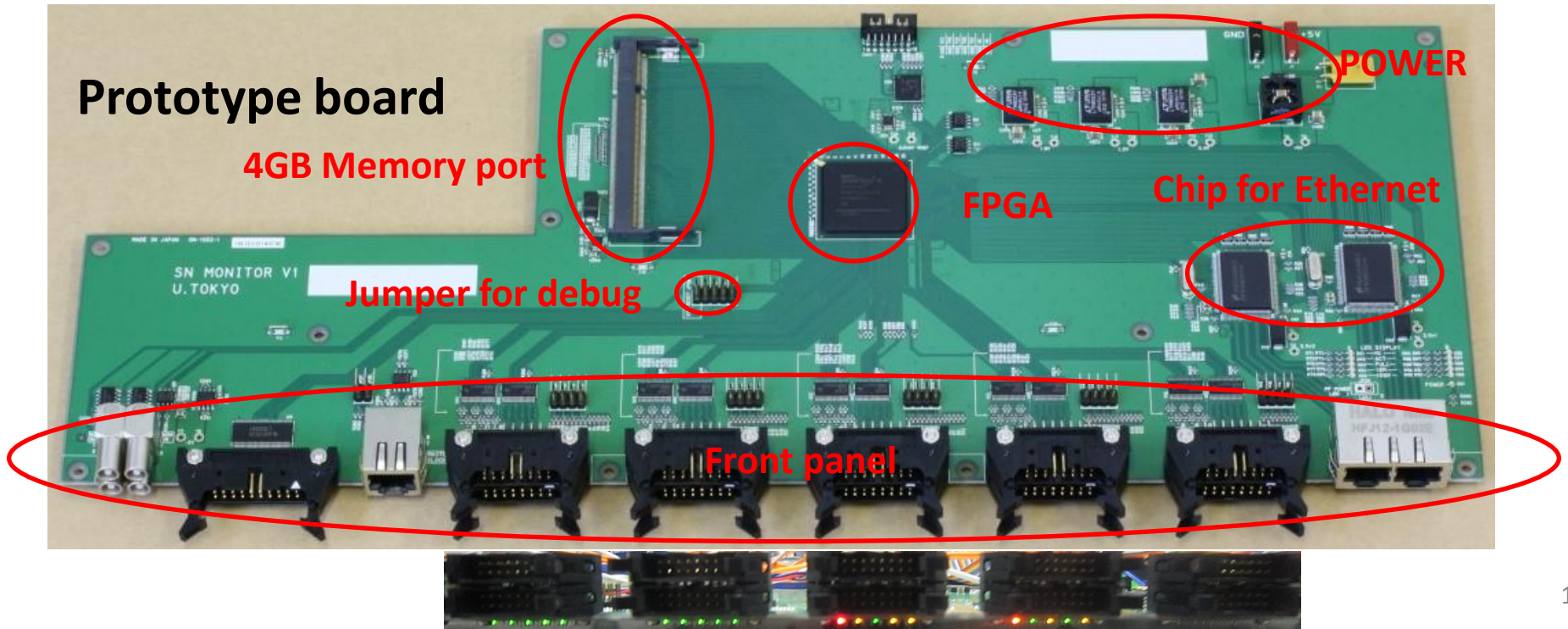


Front panel

FPGA

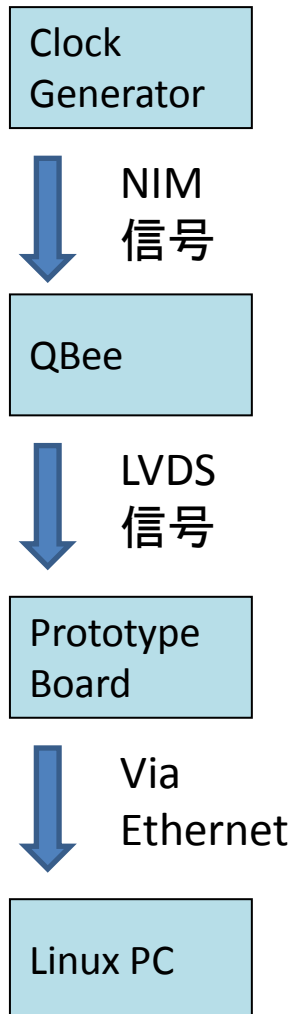
Chip for Ethernet

POWER



4, プロトタイプの作成と性能評価

4-2, Digital HITSUMの入力・Ethernetの性能評価



1. Clock generatorにて10kHzのNIM信号を生成しQBeeに入力する(PMT信号の代わりとなる)。
2. QBeeで生成されたDigital HITSUM信号をプロトタイプ基板に入力する。
3. 60kHzに足し上げられたデータをEthernetを通じてLinux PCに送る。同時にchipscopeにて信号処理の過程をチェックした。

-> 期待通りの信号が観測され、Digital HITSUMの認識・Gigabit Ethernetの正常動作を確認することができた。

4, プロトタイプの実成と性能評価

4-3, メモリの性能評価

内田先生より頂いたVirtex3用メモリ programをSpartan6用へと書き換え、VeritakWinにてシミュレーションを行い、シーケンス動作を確認しメモリ実装。期待通りのデータをwrite、readしていることを確認した。

注意点:

(1) VirtexとSpartanでは、プリミティブの名称・仕様が異なる。

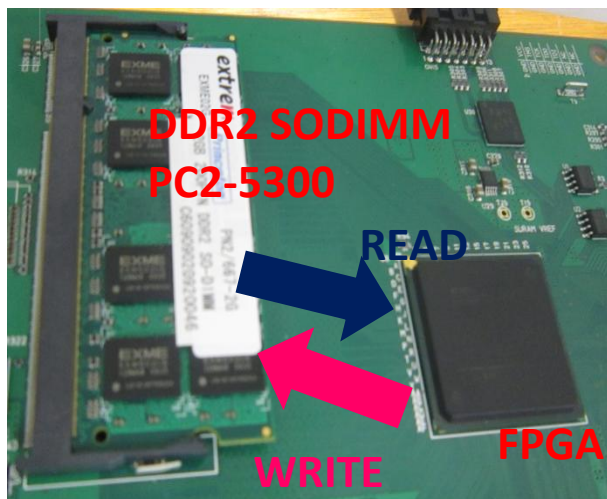
例:VirtexではIDDR,ODDR、Spartanでは、IDDR2,ODDR2。

IDDR2に入力する信号はFDではなく、IDDR2を介さなくてはならない。

(2) 出力 I/O規格の規制

データI/OピンをSSTL_IIIにし、両端終端をしようとしたが、SSTL_IIIはBANK0,2では使用できないことが後に分かった。出力I/O規格にはいくつかバンク規制があるようです。

->次ページにて説明。



5, 失敗談・Open-itへの要望

5-1, 基板作成に関する失敗談

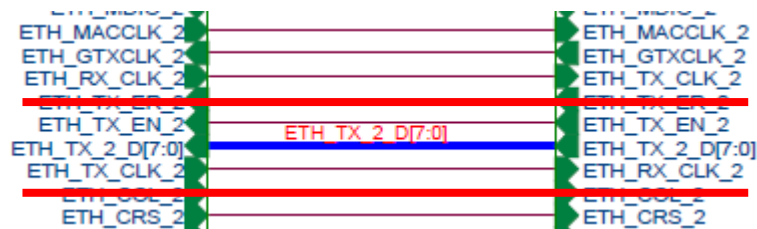
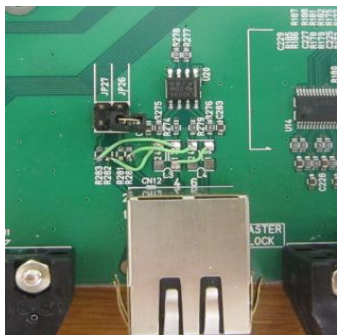
1.プロトタイプ作成依頼直前にRJ45部品を変更したため、配線ミスが発生してしまっ。ジャンパーを飛ばすことにより今回は対処した。次回の改版で修正する。

2.OrCAD内でGigabit Ethernetに使用するTX_CLOCKとRX_CLOCKを間違えて接続してしまった。FPGAプログラム内で修正可能だったが、発見までに結構時間がかかり苦労した。配線の確認は1本1本慎重に。

3.ISEコンパイル中にBANK0,2ピンにおけるSSTL_II規格が使用できないことが発覚。現在はSSTL_Iで代替しているが、次回の改版で修正する。
各BANKにおける設定できない信号規格は、

<http://japan.xilinx.com/support/answers/34313.htm>

を参照。特にメモリを設置する、LVDS信号を出す場合には注意が必要。



5, 失敗談・Open-Itへの要望

5-2, Open-Itへの要望

全くの初心者から始めたにもかかわらず、一つの基板を作成することができたのは先生方のご指導があったからです。ありがとうございます。

僕にとってですが、サンプルプログラム、サンプル基板設計図はとても参考になりました(勉強においても・設計においても)。すぐに参照できるように、サンプルを置いたページを作成していただけたらと思いました。

また、さまざまなPDFファイル(FPGAセミナー・SiTCP等)は今でもかなり重宝しています。まとめて置いてあるページがあるとうれしいです。

今後もこのような研究会を行ってほしいです。

6, まとめと今後の予定

- SKにおける近傍超新星爆発に備えた新データ収集システムの開発を行っている。
- 時間分解能60kHzで通常保存することを決定し、付随機能としてメモリダンプシステムを実装した。
- プロトタイプ基板を作成し各機能をチェックし、期待通りの動作を行っていることを確認した。
- 今後、基板改版を行い、機能動作を確認後、マスマクロを行い今夏のSKへ導入を予定している。

backups

3, 新モジュールの仕様

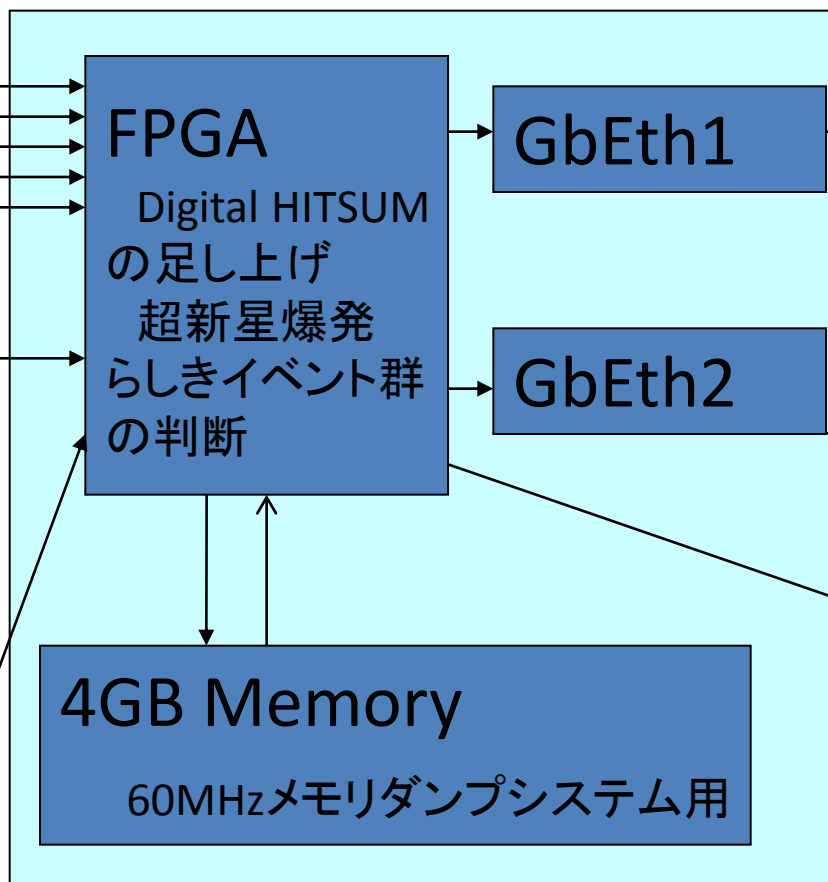
3-4, 新モジュールのブロック図

入力信号

QBeeからのDigital HITSUM 信号
× 10board (1crate)

MASTER CLOCK
(SK DAQのシステム
クロック(60MHz)と
イベントカウンター)

外部にて超新星爆発
と判断した際の
入力信号



出力信号

FPGAにて作成した
60kHz summed
HITSUM信号。

メモリにダンプされた
60MHz summed
HITSUM信号。

内部にて超新星爆発
と判断した際の
入力信号

5, 失敗談・Open-itへの要望

5-2, FPGAプログラムに関する失敗談

FPGAプログラムではおおく

clockの名前に注意。ちがうclockをalways文中に使っていて動かないことがあった。

.NAME (NAME)の時の()の中に注意。エラー文がでないことが多い。

作成したいプログラムのブロック図・期待される信号図は常に書き出してみる。頭の中で行おうとするとどうしてもミスが残ってしまう。

Cipscopeはとても便利ですんので是非活用してください。

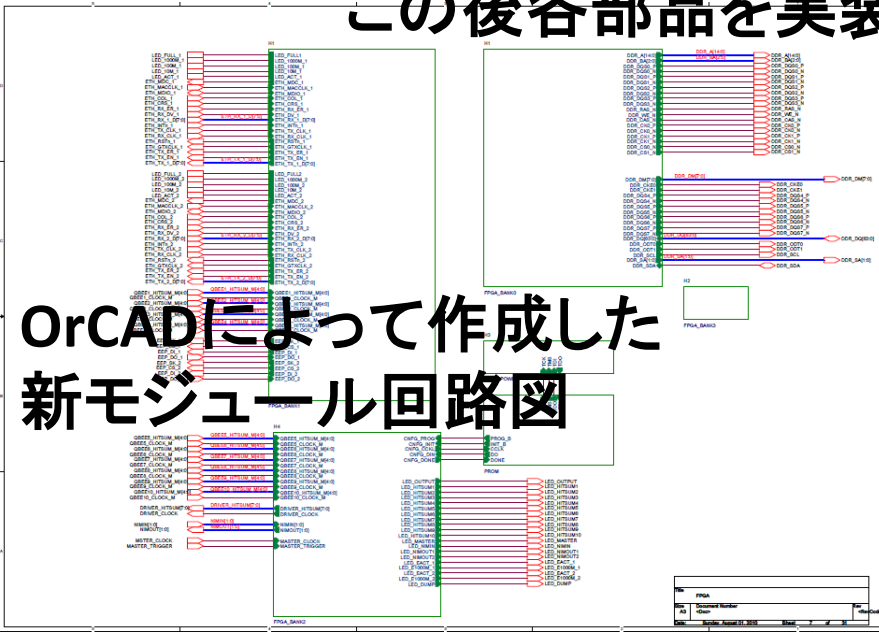
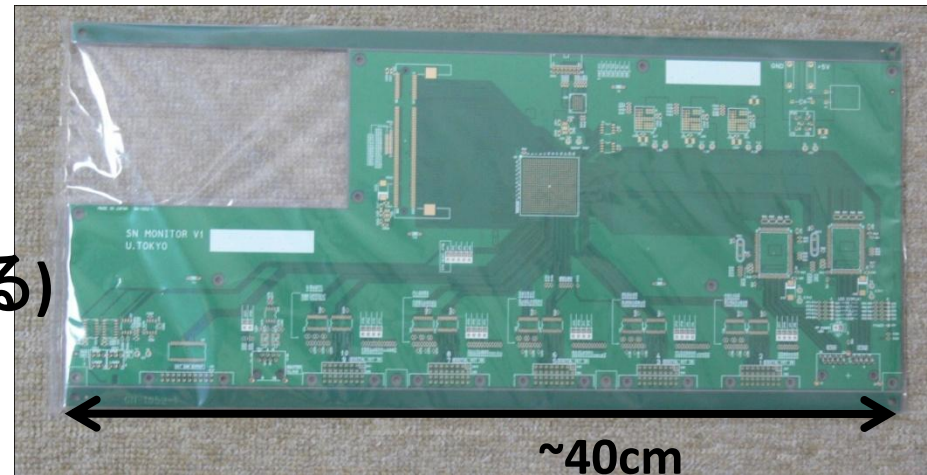
Virtexとspartanではプリミティブの名称が違うことが。またルールも違うようです。(IDDR,IDDR2のような)

4, 開発の現状と今後の予定

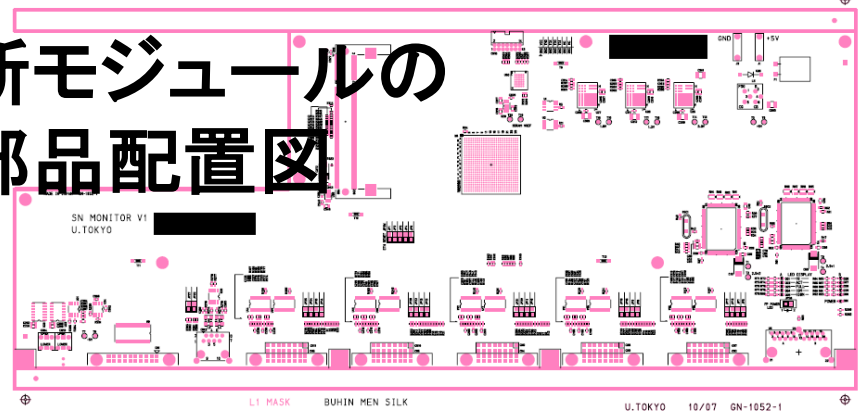
4-1, 開発の現状

現在、回路図を完成させ業者にプロトタイプを作成を依頼している。学会終了後に納品予定。

プロトタイプ基板写真
(基板、配線済み写真。
この後各部品を実装する)



新モジュールの
部品配置図



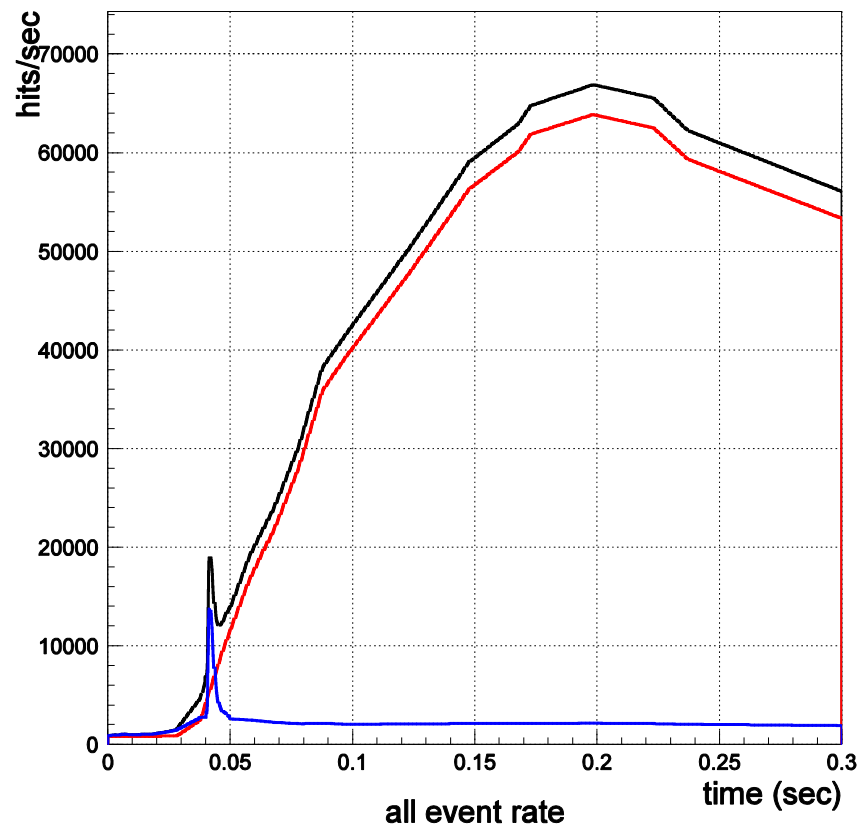
3, 新モジュールの仕様

3-3, 超新星爆発における時間構造の測定

時間分解能0.06[MHz]に設定した際に実際に観測される超新星爆発のヒットをシミュレーションした

- $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$
- $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$
- All events

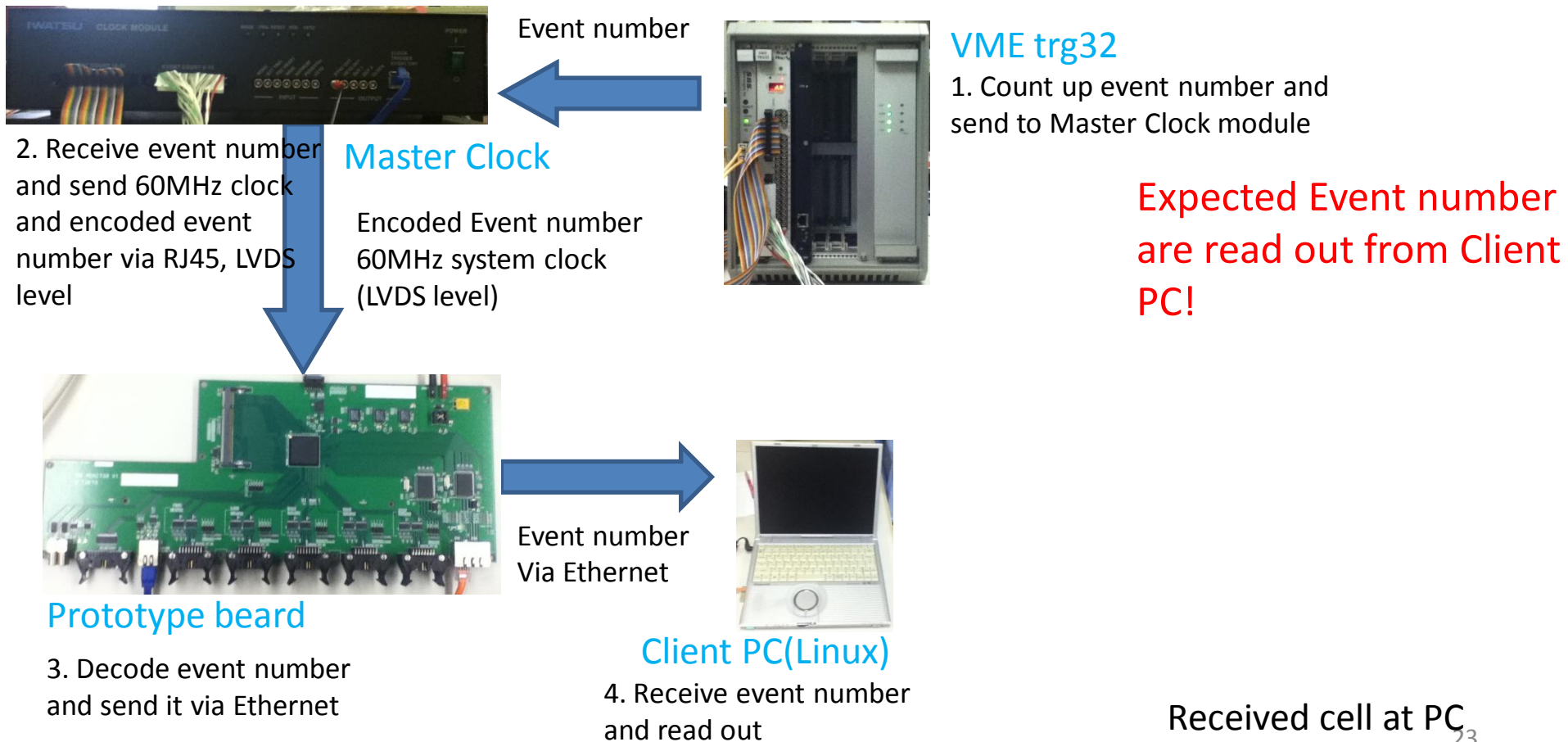
中性子化バースト(横軸0.04sec付近のピーク)の認識ができ、時間構造の評価が、0.06[MHz]でも可能なことが確認できた。



距離500ly (Betelgeuse)で超新星爆発が起こった際のヒット数の時間構造。

Behavior check of prototype board

- Check of Ethernet behavior using event number from Master Clock



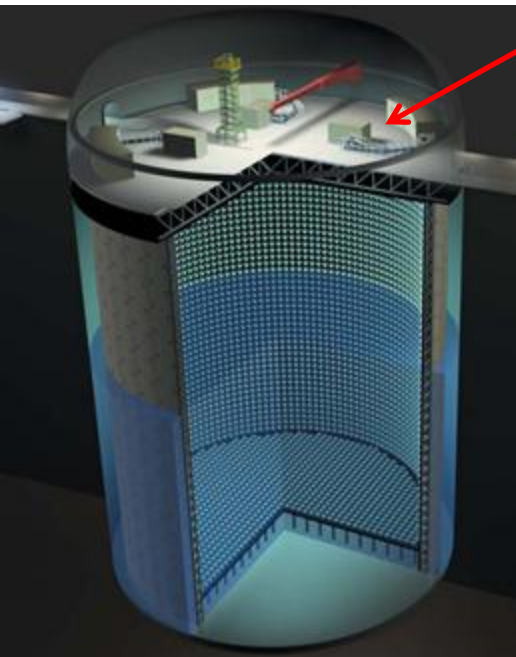
Famous Star Is Shrinking, Puzzling Astronomers

Researchers at the University of California, Berkeley, first measured the star in 1993 with an infrared instrument on top of Southern California's Mount Wilson. They estimated the star to be as big around as [Jupiter](#)'s orbit around the sun. But measurements made since then using the same instrument show that Betelgeuse has withered by 15 percent—a reduction in size roughly equal to the orbit of [Venus](#)—over the past 15 years.

The cause of the star's rapid contraction is a mystery. But the team noted that they had observed an unusual big red spot on the star three years ago.

新モジュールの設置場所

SKタンク上にある4つのエレクトロニクスハットにQBeeを設置している。その下部に設置する予定である。



エレクトロニクスハット

Master Clock

digital HITSUM output
from QBee

We will place new module
here.

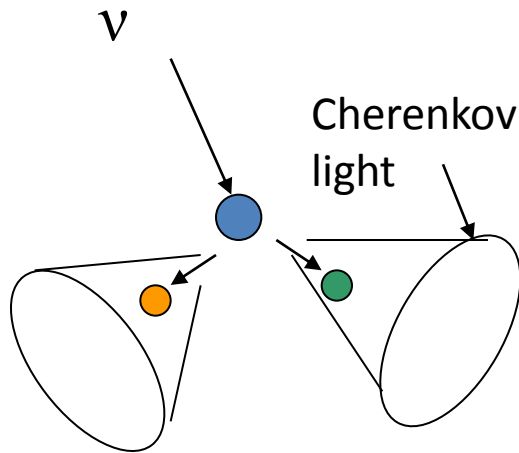


時間分解能の評価

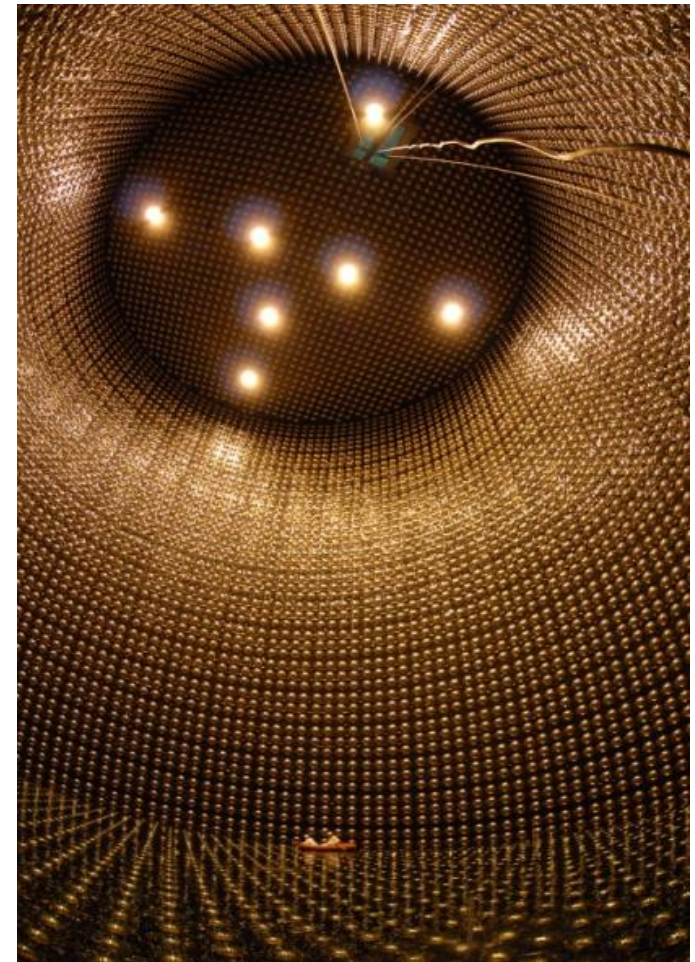
- このシステムの最大なバックグラウンドはPMTのダークノイズであり(4,500[hits/sec/PMT])ダークノイズのふらつきとイベントの区別ができる必要がある。

スーパーカミオカンデ検出器

スーパーカミオカンデ検出器(以下SK検出器)とは、地下1000mに設置された50,000トンの水チェレンコフ検出器であり、約13,000本の光電子増倍管(PMT)が設置されている。SK検出器では主に、太陽、大気、超新星爆発ニュートリノの観測・人工ニュートリノ観測による振動解析(T2K実験)・陽子崩壊探索等を行っている。



光電子増倍管(PMT)



スーパーカミオカンデ検出器

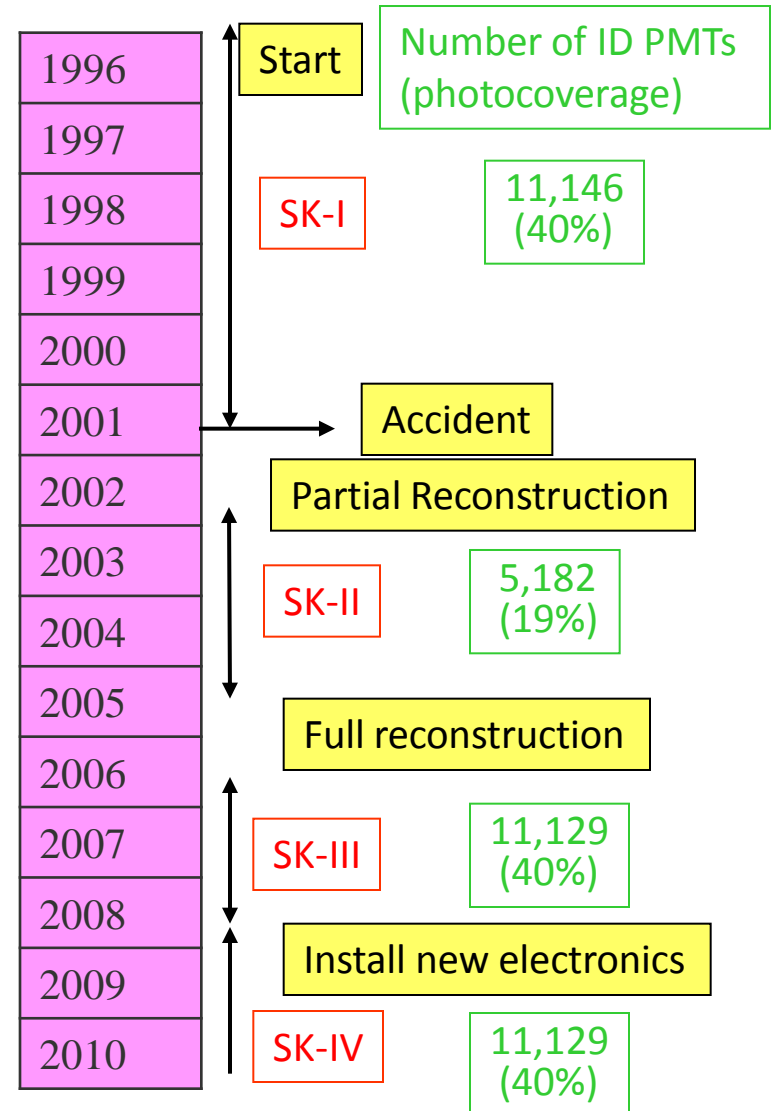
SK検出器のフェーズ

SK検出器は1996年より観測を開始し、2001年に行われたメンテナンスまでの期間をSK-Iフェーズと呼んでいる。

その後のアクシデントにより半数のPMTでSK-IIフェーズとして観測を開始し、PMTの数をSK-Iフェーズの時とほぼ同数に戻し、2006年よりSK-IIIフェーズとしての観測を開始した。

2008年9月に、新エレクトロニクス・新DAQシステムを導入し、SK-IVフェーズとしての観測を開始した。

次ページにて、新エレクトロニクス、新DAQシステムの説明を行う。



新エレクトロニクス

QTC-Based Electronics with Ethernet (QBEE)

Ethernet

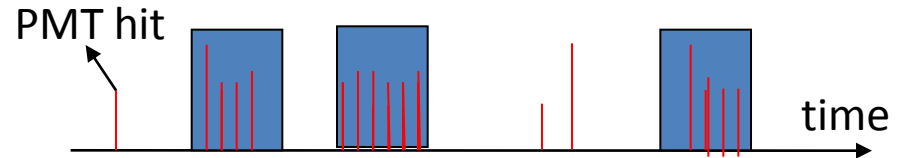
60MHz Clock

PMT
Signal
(24PMT)



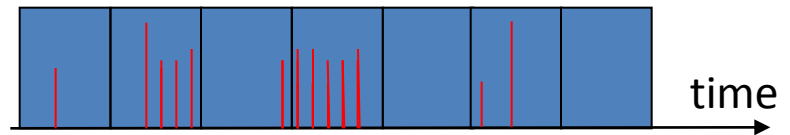
QTC TDC FPGA

• 以前のDAQシステム



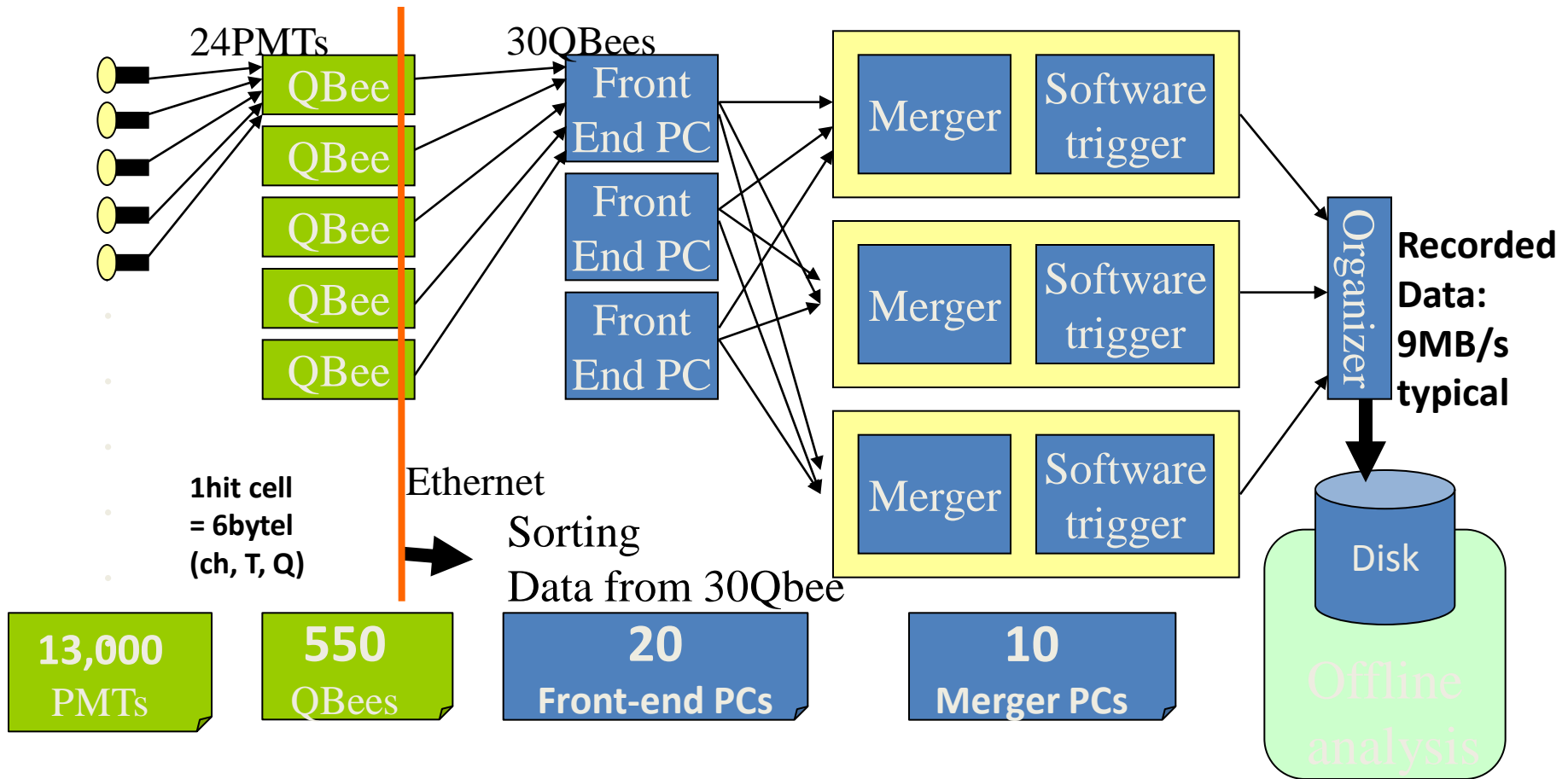
→ 以前のDAQシステムではトリガーされたイベント情報のみをオンラインに送っていた。

• 現行のDAQシステム



→ 現在、新エレクトロニクス導入により、デジタル化の高速化が実現し、全てのPMTヒット情報をオンラインに送り、トリガーをかけることが可能となった。

現行のDAQシステム



超新星爆発

超新星爆発とは星の最期の一瞬に起こる大きな爆発である。

光学的な観測が主に行われてきたが、1987年SK検出器の前身であるカミオカンデ検出器が大マゼラン星雲での超新星爆発より11個のニュートリノを観測した。

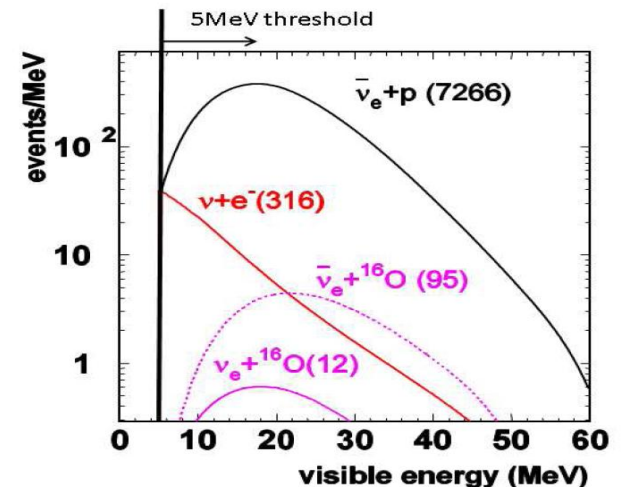
SK検出器はその大きさから世界一超新星爆発ニュートリノの観測に適した検出器であり、現在も積極的に探索を行っている。

超新星爆発ニュートリノの観測により、超新星内部の情報を見ることができ、メカニズム解明に大きく寄与することができることが期待される。

SK-I,II,IIIでの探索結果より銀河内での観測確率の上限值0.27[SN/year]@90% C.L.を得ている。



大マゼラン星雲で起きた超新星爆発



銀河中心(10kpc)で超新星爆発が起こった際SK検出器で観測される事象数分布

Summary of the test results w/o the pre-scaling system

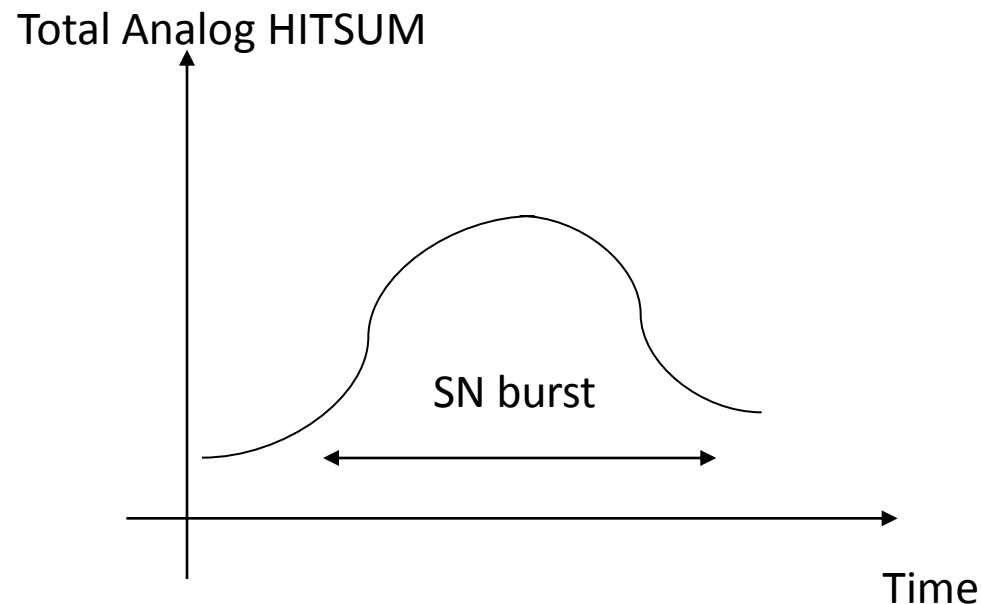
# of flashes	Max. flash rate(MHz)	TDC L1 buffer full	Qbee (SIC) buffer full	DB buffer full	Processing Time(min)
3M (1.5% occupancy)	1	usual	None	None in 10s	~10
6M	2	usual	None	None in 10s	~10
10M	3.3	usual	None	1, 2.8s 2, 2.8%	~10
15M	5	usual	1, 0.2s 2, 2.4%	1, 2.4s 2, 20%	~20
30M	10	1, 0 s 2, 2.4 %	1, 0.1s 2, 17.1%	1, 2.3s 2, 37%	~20
7.5M (x4)	2.5	1, 0 s 2, 4.7 %	1, 0.05s 2, 20%	1, 2.4s 2, 41%	~20
15M(x4)	5	1, 0 s 2, 12 %	1, 0.05s 2, 46%	1, 2.3s 2, 68%	~20
30M(x4)	10	1, 0 s 2, 46 %	1, 0.05s 2, 71%	1, 2.3s 2, 77%	~10

x4: occupancy is about 4 times larger than the usual test.

1, starting time of buffer full from the beginning of the burst
2, max. percentage within the burst period

2, Measure the light curve of SN burst (plan)

- Obtain information of total charge of SN burst events
 - > Measure the SUM of Analog HITSUM
- rough measurement as a backup of DAQ system
 - > Need to work independently from online system
- Need to be applicable to measure a SN burst at 500ly distance



Current hardware trigger system

- SUMAMP of the hut will saturate at the high rate
- record the trigger rate but not record the value of HITSUM

Estimation of the Limitation factor

from DAQ system for processing SN burst data (reminder)

1, event rate limitation

A, event rate = $\sim 19.6\text{MHz}$ (Qbee : L1 buffer full) : occupancy 1.5%
 $= (300-5)\text{kHz/ch} / 0.015$

B, $\sim 8.3\text{MHz}$ (Qbee: SIC full) : occupancy 1.5%
 $= (130-5)\text{kHz/ch} / 0.015$

2, Limitation of Total data size

A, Qbee: Daughter board buffer size

$32\text{MB/Qbee} - 7.2\text{M/Qbee}(\text{dark}) = 24.8\text{MB/Qbee} = 4.1\text{Mhits}$

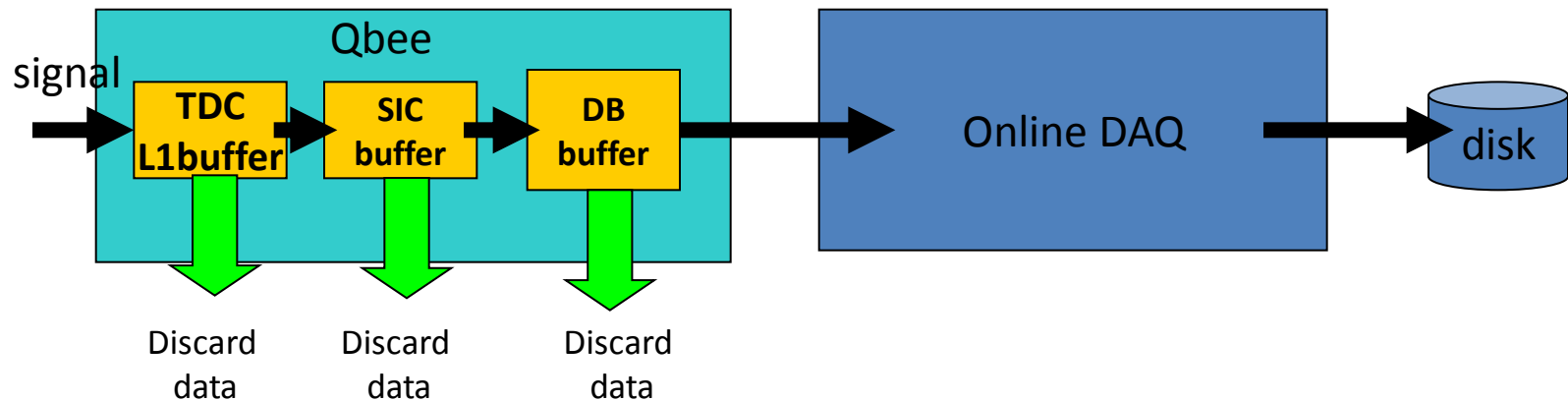
11.4M events (Empty buffer, 10s duration, 1.5% occupancy)

3, Limitation of Online DAQ processing speed (Bottle neck)

A, SLE trigger rate : 12-13kHz

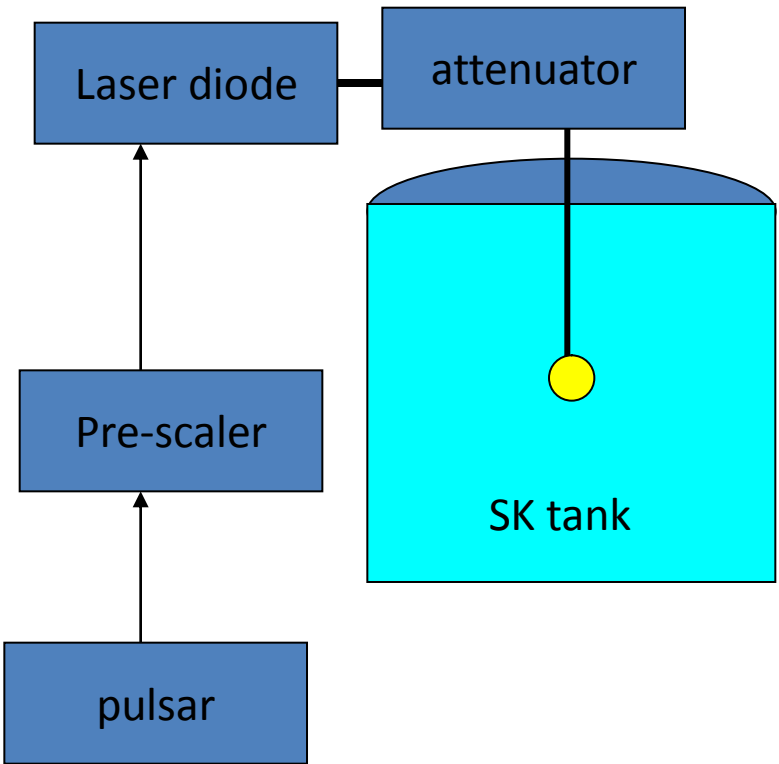
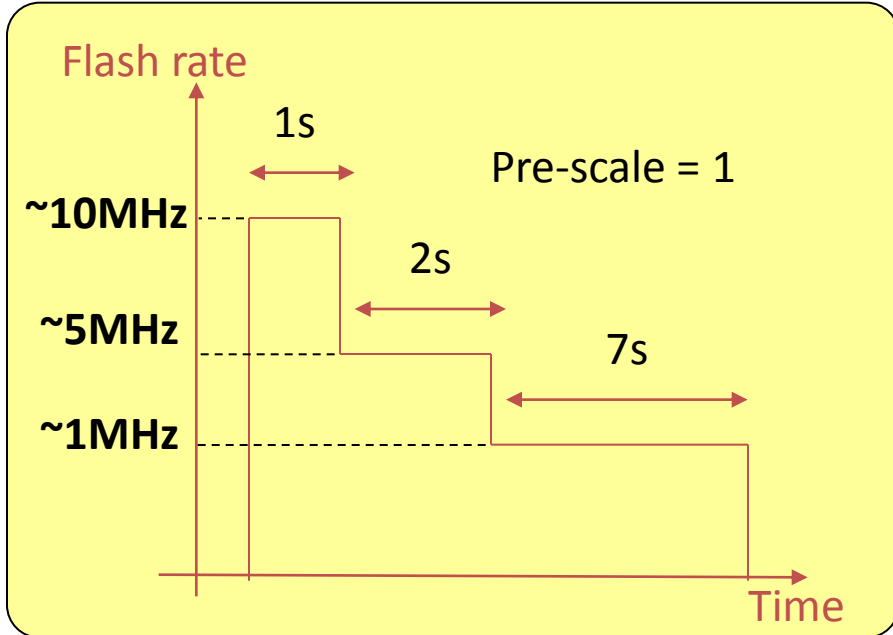
(corresponds to the SLE rate of $E_{\text{thr}} \sim 3\text{MeV}$, current setup $\rightarrow E = \sim 4\text{MeV}$)

B, neutron(relic) trigger $< \sim 40\text{Hz}$: set by software



Setup of the SN burs test(w/ elec. Group ; Nakayama, M. Dziomba)

Mimic a SN burst by a light pulsar (occupancy ~1.5 %)

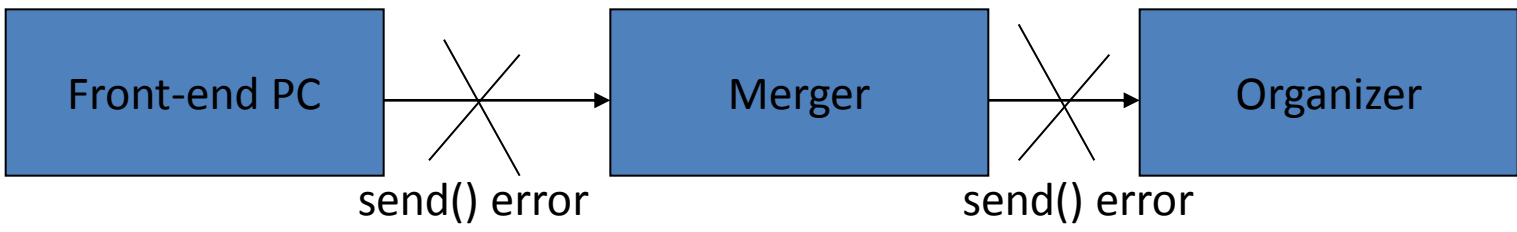


Max. flashing rate of this system = 10MHz

Max. event rate from the SN burst at the distance of 500ly will become 30MHz

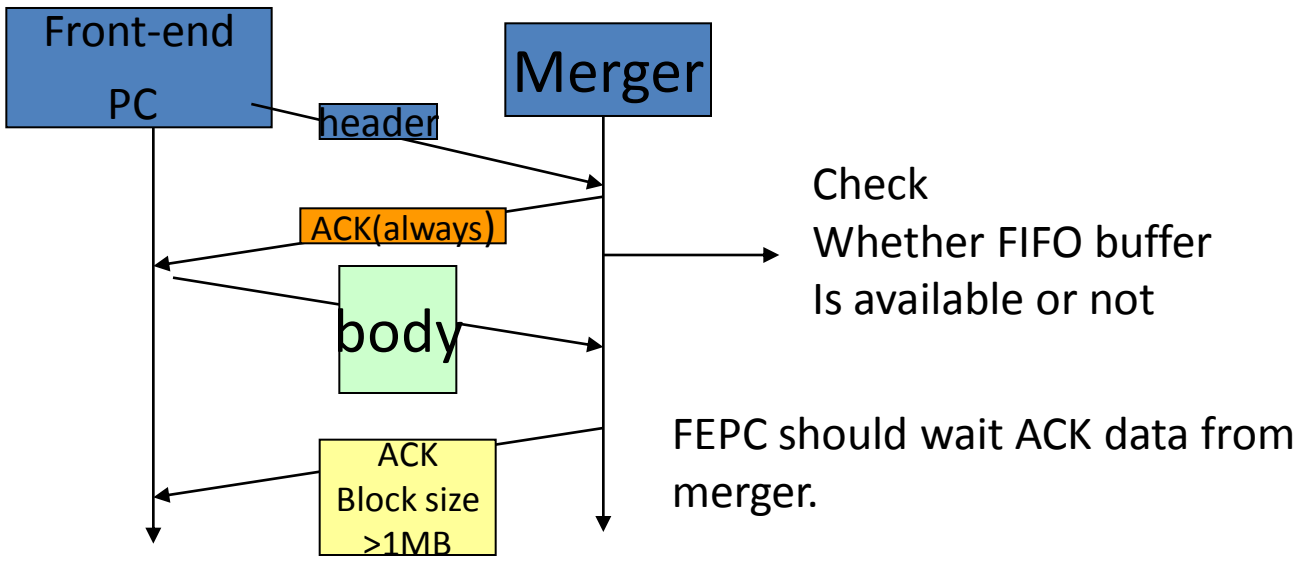
So we usually increase the occupancy (x4: 6-7%) to mimic those high rate case.

DAQ error in the nearby SN burst test



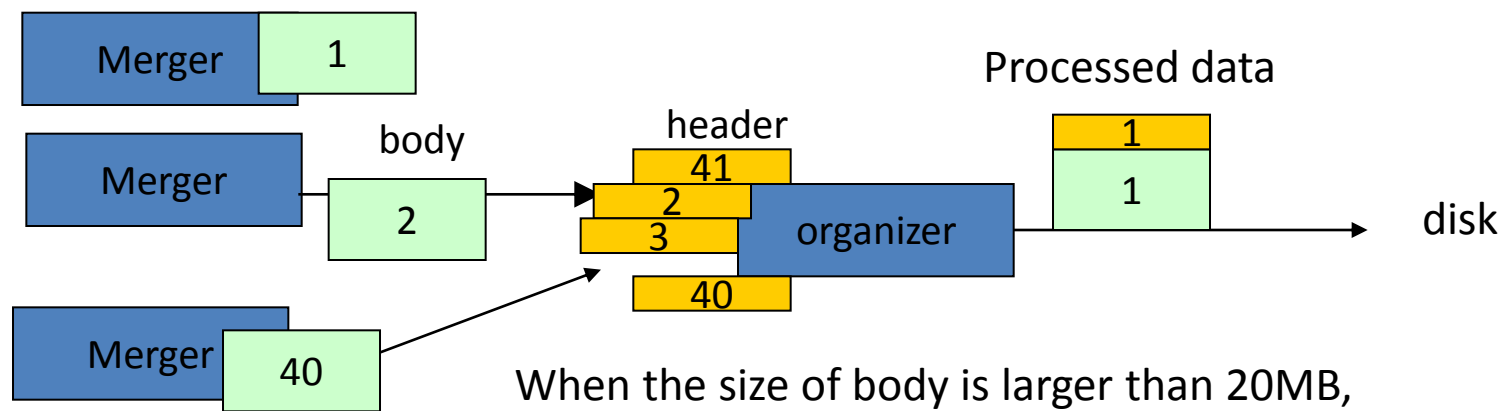
-- To reduce the packet loss in the network switch, we implement the flow control the data flow in the application level

Flow control (1)

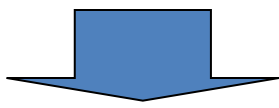


The same kind of scheme was implemented in merger-organizer

Flow control (2)



When the size of body is larger than 20MB, organizer can receive only the next data block. (In this case, organizer can receive block #2.)



After the modifications

No DAQ stop in 15 trials with 7.5 MeV (x4) and max. rate of 2.5 MHz

No DAQ stop in 11 trials with 10 MeV (x4) and max. rate of 3.3 MHz

-> DAQ system is stable in the nearby SN burst case.

w/o pre-scaling system

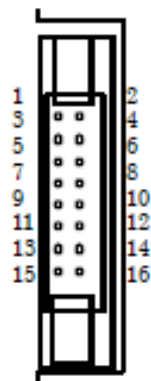
Amount of SN burst data			
7.5M (x4)	2.5MHz	12dB 1/4	: ~ 63 subruns
10M (x4)	3.3MHz	12dB 1/3	: ~ 66 subruns
15M (x4)	5	12dB 1/2	: ~ 45 subruns
30M (x4)	10	12dB 1/1	: ~ 14 subruns

5.1.3 デジタル HITSUM 出力部

デジタル HITSUM 出力部はフロントパネルに取り付けられたヒロセ 16 ピンコネクタ HIF3BA-16PA-2.54DS 相当品で構成される。

表 5-3 16 ピンコネクタ(デジタル HITSUM 出力)

ピン番号	信号名	I/O	信号レベル	機能
1	CLK Out	O	LVDS	60MHz クロック出力(+)
2	*CLK Out	O	LVDS	60MHz クロック出力(-)
3	N.C.	-		
4	N.C.	-		
5	HITSUM0	O	LVDS	デジタル HITSUM0(+)
6	*HITSUM0	O	LVDS	デジタル HITSUM0(-)
7	HITSUM1	O	LVDS	デジタル HITSUM1(+)
8	*HITSUM1	O	LVDS	デジタル HITSUM1(-)
9	HITSUM2	O	LVDS	デジタル HITSUM2(+)
10	*HITSUM2	O	LVDS	デジタル HITSUM2(-)
11	HITSUM3	O	LVDS	デジタル HITSUM3(+)
12	*HITSUM3	O	LVDS	デジタル HITSUM3(-)
13	HITSUM4	O	LVDS	デジタル HITSUM4(+)
14	*HITSUM4	O	LVDS	デジタル HITSUM4(-)
15	GND	-		GND
16	GND	-		GND



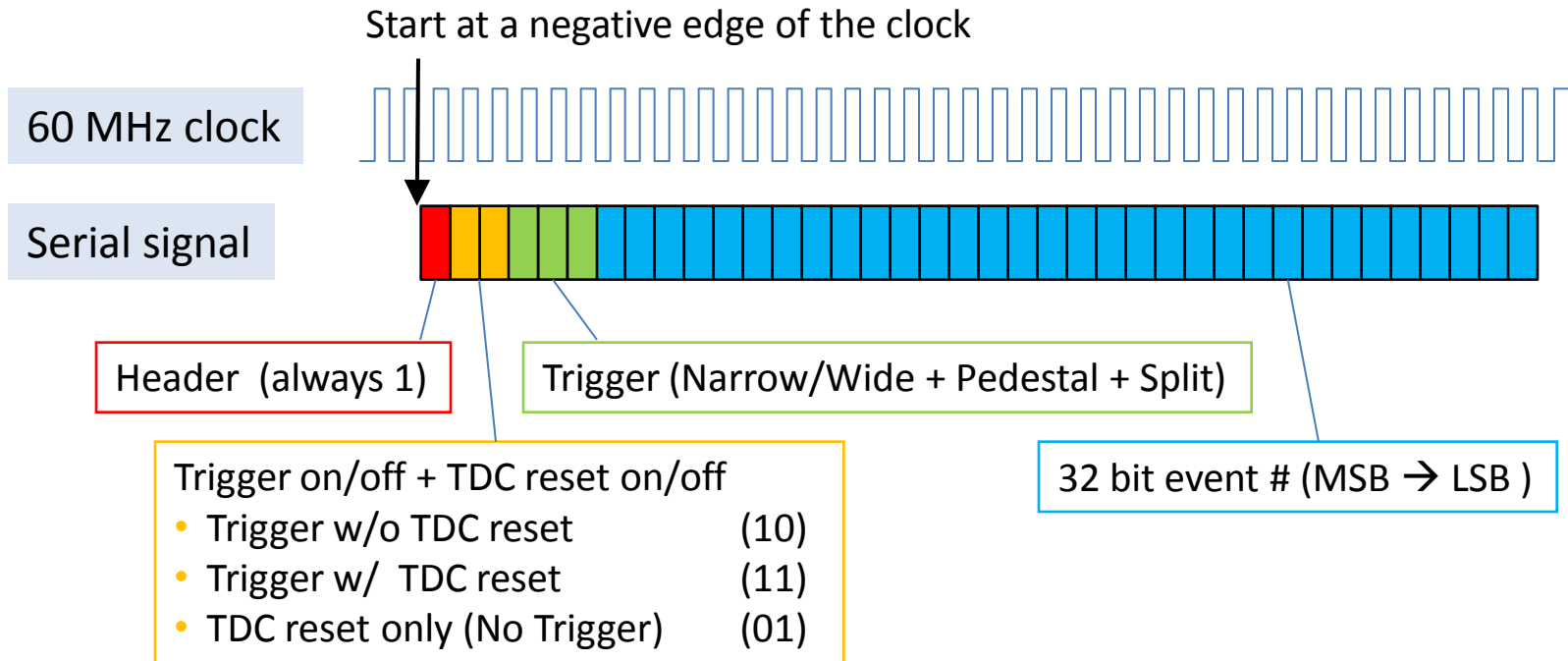
Qbeeの16pin connector
からLVDSで出力
される

CLK_Out は、60MHz マスタークロックの出力である。

HITSUM[4:0]は、5bit のデジタル HITSUM 信号出力で、マスタークロックの立ち上がりに同期して出力される。

MCLK output specification

- Output [2 pairs in 1 UTP cable]
 - (1,2) pair 60 MHz clock
 - (5,6) pair Trigger + 32 bit event # + TDC reset
 - (3,4) and (7,8) pairs (not used, for future unification of CLK/TRG and 100BASE-TX)
- Spec. of serial signal [1 bit = 1 clock, total 38 clocks = 633 nsec]



時間分解能の評価

時間分解能 ... 各binで予想される
dark noiseの数

60[MHz] ... 0.83 ± 0.9 [hits/bin]

10[MHz] ... 5 ± 2.2 [hits/bin]

1[MHz] ... 50 ± 7.1 [hits/bin]

0.1[MHz] ... 500 ± 22 [hits/bin]

0.06[MHz] ... 830 ± 26 [hits/bin]

0.01[MHz] ... 5000 ± 71 [hits/bin]

1event ... 120 ± 11 [hits/event]

出力データの時間分解能[MHz]	60kHz counter [byte]	Sub counter [byte]	Hit数のデータサイズ[byte]	1信号のデータサイズ[byte]	1モジュールあたりのデータ量 [MB/s]
60	4	2	1	8	3.8×10^3
10	4	2	2	9(12)	960
1	4	1	2	8	64
0.1	4	1	3	9(12)	9.6
0.06	4	0	3	8	3.8
0.01	4	0	3	8	0.64

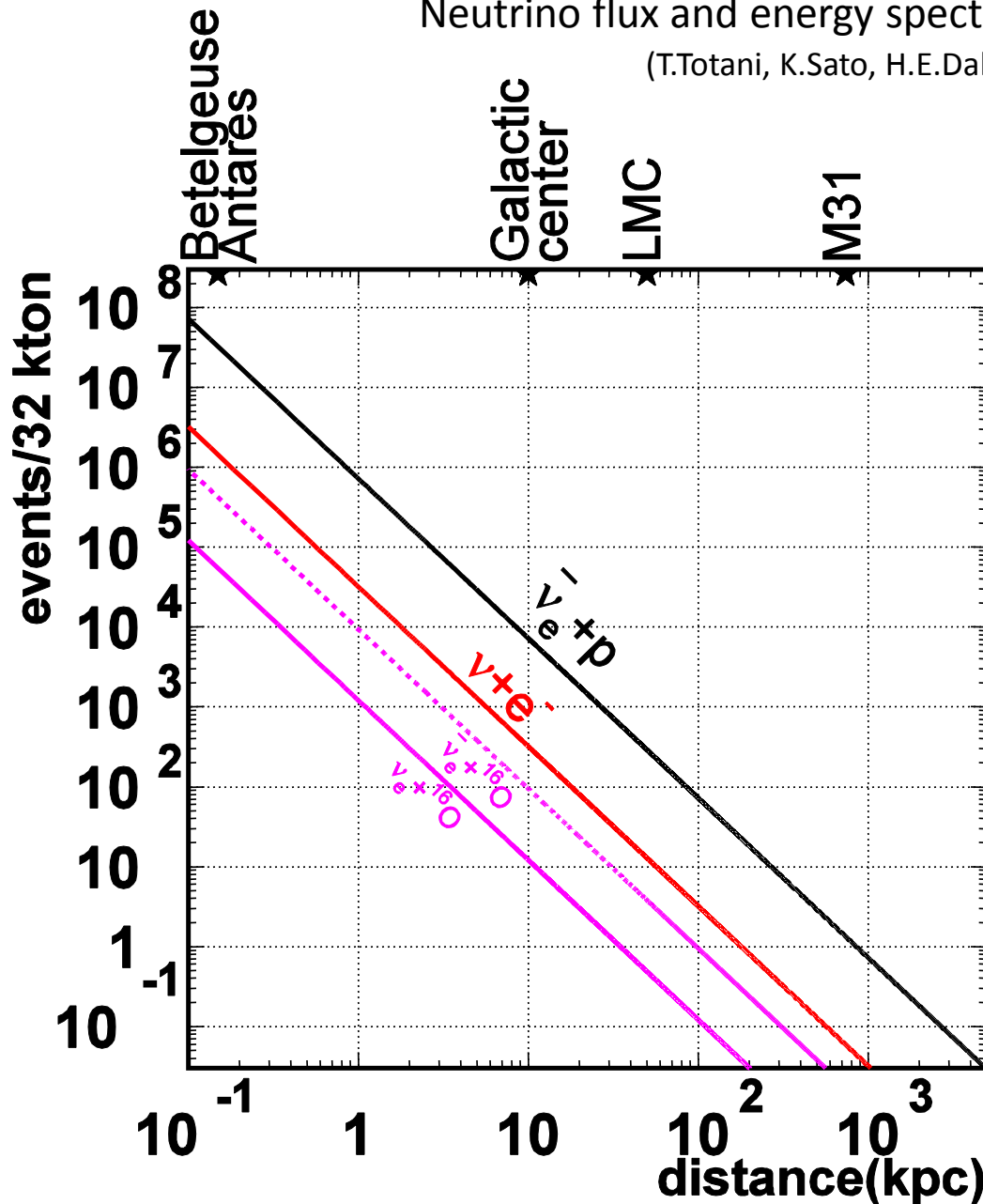
1binに1eventあったときに、60[kHz]の時間分解能を持っていればdark noiseとの区別が可能となる。10[kHz]では厳しい。

5[MB/s]は処理が容易 60[kHz]の時間分解能で取得するのがよい。

Expected number of events from a supernova at SK

Neutrino flux and energy spectrum from Livermore simulation

(T.Totani, K.Sato, H.E.Dalhed and J.R.Wilson, ApJ.496,216(1998))



5MeV threshold

~7,300 $\bar{\nu}_e + p$ events

~300 $\nu + e$ events

~100 $\nu_e^{(-)} + {}^{16}\text{O}$ events

for 10 kpc supernova