

物理計測器における技術開発

—素粒子実験への応用—



技術解説

能 町 正 治*

Engineering in experimental apparatuses
—application to particle physics—

Key Words : Double beta decay, SpaceWire

物質を構成している素粒子であるクォークとレプトンにはそれぞれ反粒子が存在している。しかし、我々の周囲には反粒子からできた反物質は存在していない。一方、これまでに観測された反応では粒子と反粒子が組になって生成されることから、宇宙のはじめに粒子が生成されたときには同じ数だけの反粒子が生成されているはずである。

粒子と反粒子は衝突するとその質量の持つエネルギーがガンマ線などとして放出され消滅してしまう。もしも我々の周りに反物質が存在したら膨大なエネルギーが発生することになるが、幸い我々の周りではそのような現象は起こっていない。どこか遠い宇宙に反物質でできた世界がないか調べられたがそのようなものは見つかっていない。どうも我々の宇宙は物質でできていて反物質は消滅してしまっているようである。

もっとも、我々は2種類の粒子で残った方を物質と呼んでいるわけだが、なぜ一方の粒子のみが残ったのであろうか。これは現在物理学で最も興味もたれている問題のひとつである。消滅によって生じたガンマ線などのエネルギーと物質量の比から推測すると粒子のほうが反粒子に比べ100億分の1ほど多

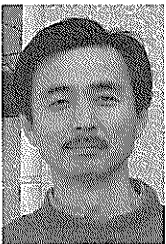
ければ現在のような宇宙の姿になることがわかっていて、ほんのわずかの差だからたまたま多かったと言いたいところだが、これまで知られている反応では決して生じないくらいの大きなずれである。

これを説明しようとする

- 1) まず粒子数のみを増やす反応がなければならない。
- 2) その場合でも、反粒子数を増やす反応も同様に起こってしまうので、それだけでは粒子が多いことにはならない。そのため粒子と反粒子で反応速度(寿命)が違わないといけない。
- 3) それでも逆反応が同様に起こってしまった場合は元に戻ってしまう。そこで、反応が非平衡状態で進行する必要がある。

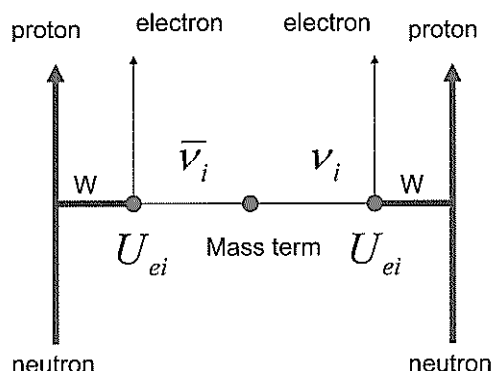
我々はこのはじめの2つについて測定しようとしている。これらは100億分の1というわずかな差を生じさせたということからわかるように非常に稀な現象である。

我々は粒子数のみを増やす反応としてまだ観測されていないニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊の研究を行っている^[1]。2重ベータ崩壊は単独のベータ崩壊はエネルギー的に許されないが2つのベータ崩壊が同時に起こればエネルギー的に許されている場合に起こる反応である。2重ベータ崩壊には2つの電子とともに2つの反ニュートリノを放出し粒子数と反粒子数の差を変化させない反応と、ニュートリノを放出せず電子のみを放出し粒子数と反粒子数の差を変化させる反応がある。このうち、ニュートリノを伴う2重ベータ崩壊は観測されているが、ニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊は 10^{26} 年以上の半減期を持つと考えられている非常に稀な現象で、まだ観測されていない。



*Masaharu NOMACHI
1956年1月生
1983年大阪大学大学院理学研究科物理学専攻修了
現在、大阪大学大学院理学研究科附属原子核実験施設、教授、理学、素粒子実験
TEL 06-6850-5505
FAX 06-6850-5516
E-mail : nomachi@ins.sci.osaka-u.ac.jp

我々は ^{100}Mo のニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊の測定を目指している。10²⁶年の半減期だと ^{100}Mo を100kg(1000mol)集めても年に平均4回しか起こらない稀な現象である。このような稀な現象を捕まえるには高感度の検出器が必要になる。高い感度をもとめ、世界中で高感度検出器の開発が行われている。検出効率を上げバックグラウンドを下げるためにさまざまな技術開発が行われている。



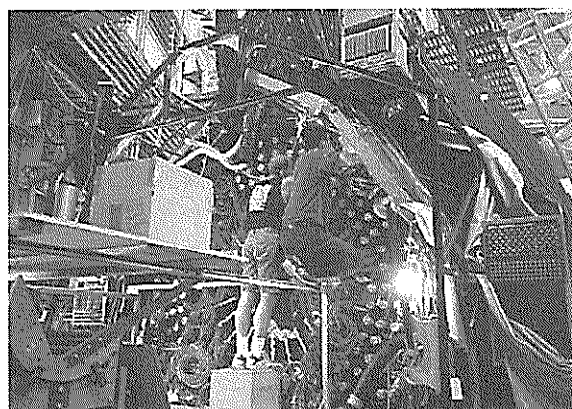
ニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊。
中性子2個が陽子2個と電子2個となっている。

高感度検出器では、自然界にわずかながら存在する放射性の原子核がバックグラウンドとなる。様々な物質中に存在する ^{214}Bi がアルファ崩壊してできる ^{214}Po は寿命164 μs でアルファ崩壊し ^{210}Pb になる。検出器中にわずかに紛れ込んだ ^{214}Bi が連続崩壊する場合、2つの崩壊がほとんど同時に起こると、2重ベータ崩壊と区別が付かなくなることがある。純度の高い物質を使っても10mBqの ^{214}Bi があった場合、年に10万個の連続崩壊が起こる。これを2重ベータ崩壊と間違える確率がたとえ1万分の1であったとしても年に10個となってしまう。1万分の1の確率で2つの事象の時間差は16.4ns以下となるので、バックグラウンドを排除するためには短い時間差も測定しなければならない。

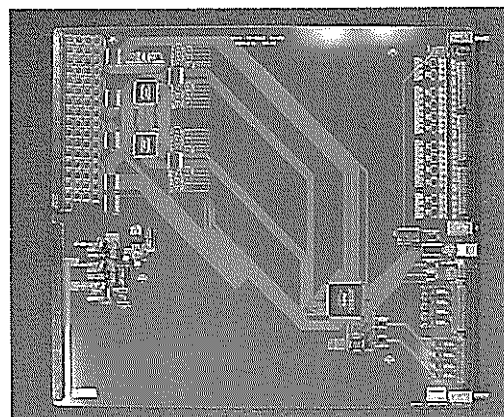
これは高感度検出器のための技術開発の一例であり、この他にもエネルギー分解能を向上させるための様々な開発を行い世界最高感度の検出器を目指している。

K中間子の稀崩壊の研究は粒子と反粒子による反

応の違いをもたらすCP非保存を測定する実験である。我々はK中間子が崩壊する際、数百億回に一回おこる特殊な崩壊現象を測定することにより粒子と反粒子の違いを生じさせるCP非保存の測定を行った^[2]。この実験では大量の崩壊事象からいかにして測定したい崩壊現象を効率よく見つけるかが鍵となる。この実験のための検出器は多数のセンサーからなっていて、それらから集められたデータをもとに事象の判別が行われる。このため多数のデータを集めそれを使って高速に判断を行わなければならない。事象の選別は多段にわたって行われ、だんだん絞り込んで行く。我々は一番初めに選別を行うための高速エレクトロニクスを開発して実験に組み込んだ。高速のPLDを用いた回路は入出力の時間も含めわずか16nsで判断をだすことができた^[3]。



アメリカ合衆国Brookhaven国立研究所で行ったE949実験で用いられたK中間子稀崩壊検出器。円筒型に設置されたプラスチックシンチレーターからの信号を読み出す多数の光電子増倍管が見えている。E949実験グループ提供。



K中間子稀崩壊で使用した高速論理回路。大阪大学と高エネルギー加速器研究機構により開発された。

これらの研究では検出器の限界に挑む必要があり様々な先進的な技術が取り入れられている。世界に先駆けて研究を進めていくには、いかにして新しい技術を迅速に取り入れていくかが鍵となる。個々の先端技術がいかにして物理実験に取り入れられているかも興味深い。ここでは検出器のデータ収集用ハードウェア開発競争を勝ち抜くために我々が取り入れている工夫を紹介する。

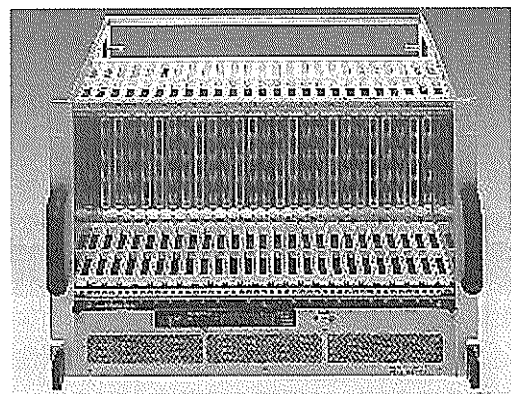
最近のエレクトロニクスの発展は目を見張るものがある。最新のエレクトロニクスを使いこなし、いかにして物理実験のアイデアを迅速に実際の回路としていくかが重要な課題となる。

我々が使用する実験装置はその実験専用開発を行うため、後にも先にもひとつしかないものとなる。とはいえ、毎回はじめから作り上げていたのでは時間も費用もかかってしまう。このためできるだけ再利用できるようモジュール化が進められてきた。放射線計測用のエレクトロニクスでは古くからモジュール化が進められ、優れた機能をもった回路を組み合わせることにより実験が行われてきた。1964年に規格が定められた NIM (Nuclear Instrumentation Methods) はアナログ回路のモジュールとしていまだに広く使われている。また 1969～1971 年にかけて規格が定められた CAMAC (Computer Automated Measurement And Control) は計測用のコンピューターインターフェースとして広く使われた^[4]。コンピューターインターフェースの規格としてはすでに時代遅れといっても良いのだが、低ノイズであることやこれまでの多くの資産があることなどからいまだに使われている。NIM や CAMAC 規格により多くのモジュールは再利用可能となった。これにより実験装置の開発期間の短縮や予算の節約が可能となり様々な実験を次々と行っていくことができるようになった。

新しい実験を行うときにすべてのモジュールが用意されているとは限らない。最先端の実験になればなるほど既存のモジュールを使うことができないことが多い。なぜなら、しばしば必要な機能を実現できないことが実験を困難にしていることがあるからである。つまり、既存のものを組み合わせてできる

ような実験はすでに行われてしまっているのである。そこで、一番要となる部分に関しては新たに開発を行い、既存のものと組み合わせて実験を行うことが多い。

回路開発で重要なのは実験のアイデアをいかにして回路モジュールとして実現するかである。その際、それ以外のことにはできるだけ時間を割かず済ませたいものである。多くのモジュールが CAMAC で開発された理由のひとつはそのインターフェースが簡単であったことである。その後多くの回路が VME で開発されたのも VME が比較的簡単なプロトコルであったことがその理由のひとつである。できるだけ既存の標準モジュールを使った上で、実験で開発が鍵となる部分を CAMAC などの規格を用いたモジュールとして開発してきたのである。CAMAC などの規格は既製のモジュールを使うだけでなく、実験のための特別なモジュールを開発するためのプラットフォームでもあった。そのため、既存のものと新しいモジュールを協調して動作させることが必須であった。



Wiener社製 CAMACクレート, SEIKO EG&G 提供。

CAMAC以降、計測用バスとして何を使うかは過去20年我々を悩ませてきた問題である。CAMACの成功の後、様々な試みがなされてきたが、いずれも成功したとは言いがたい。そのなかでも VME は広く使われたが、放射線計測用に改良を加える試みは成功したとは言いがたい。VME64 拡張の規格の一つとして米欧日の有志が集まり the VMEbus International Physics Association (VIPA)^[5] で物理計測用の規格を定めた。私もこのメンバーとして規格制定に参加したが、この規格も成功したとは言いがたい

規格の一つとなった。CAMACの場合計測用に新しい規格を作ることが成功したが、その後は新しい規格や既存の規格の拡張は大きな成功を得ることができなくなった。その理由のひとつはシャーシなどの機構部品の供給である。規格品は大量に安価なものが得られるが独自の規格や拡張を行った場合は供給が限られてしまう。産業界の標準をそのまま使っていれば産業界の既製品を利用することができる。しかし残念ながら物理実験の計測器に使用するためには何らかの拡張が必要となってしまう、それにより既製品が使えなくなると言うことを繰り返してきた。

このような繰り返しのなかで、新たなモジュール化の方法が試みられている。これまでのバスシステムでは機能モジュールはバスに接続されたモジュールとして実現された。しかしこれではモジュールの配置はバス構造の制約から限られた配置しか可能ではない。実験に必要な機能モジュールを自由に組み合わせるにはシャーシなどの制約を受けずにシステムを構築できるようになっていることが望ましい。

同様の要求と機器の小型化の要求があいまって、産業界ではシリアルデータリンクを用いたデータ転送システムが盛んに開発されている。現在我々はこれを取り入れた新しいデータ収集システムを開発している。これまで使ってきたバスシステムを置き換えるだけのものではなく、シャーシの中のバスから自由になることのできるシステムである。これにより、実験装置を自由に構築することが可能となる。さらに、モジュールの独立性が高まり、信頼性の高いシステムを効率よく開発することができる。

シリアルデータリンクとしてSpaceWireという規格を用いたシステムを開発している。SpaceWireは人工衛星用の高い信頼性をもったシリアルデータリンクとしてESAが中心となり開発した規格であり、現在はNASA、JAXAもこれに参加して開発を進めている。SpaceWireは家庭家電のためのホームネットワークとして開発されたIEEE1355をもとにしている。IEEE1355は小規模のロジックで実現できる簡素な規格であり、複雑なプロトコルは上位のアプリケーションに任されている。実験装置を開発するときには全体のシステムとしてどうやってデータを取るか

を考えるので、簡素な規格で十分である。

ここでSpaceWireについて簡単に紹介する。詳しくはESAのドキュメントに記されているので参照されたい^[6]。

SpaceWireの物理層は送受各々2対のLVDS信号線からなる。2対の信号線はDataとStrobeからなり、D-Sエンコードされている。DataはDataをそのまま表し、StrobeはDataが同じ論理レベルが続く場合に反転する。D-SエンコードではDataとStrobeのExclusive ORをとることにより容易に送信側のクロックを再現することができる。これらにより非常に小さな規模のロジックで実現することができる。クロックに対する制約は厳しくなく、論理回路が許す限り高速で送ることが出来る。安価なFPGAを使っても100～200Mbpsの転送速度を実現できる。D-Sエンコードにはクロック周波数の下限はないがSpaceWireでは時間情報を送る必要性から2Mbpsを周波数の下限と定めている。

SpaceWireは8ビットのデータキャラクター、あるいは2ビットのコントロールをデーターコントロール識別ビットとパリティビットを加えて送る。パケットはこれらのデータとコントロールを用いて作られる。あて先情報を先頭にしてデータが続きEOPコントロールで終わる任意長のデータがパケットとなる。パケット長に制限は無いが上位のプロトコルで必然的に制限が加わる。あて先は経路アドレスと論理アドレスの2通りが用意されている。経路アドレスは出て行くポート番号を羅列したもので途中のルーターはルーティングテーブルを必要としない。論理アドレスはルーティングテーブルをもとに配送される方法である。経路アドレスはルーティングテーブルの配布や末端に近いルーターの制御に使われる単純なルーティング方法である。

SpaceWireは各々のリンクごとにtoken (FCT コントロール)を用いたデータキャラクターのフロー制御を行っている。それより上位のフロー制御は上位のアプリケーションレベルで行う。これもデータをどう取るかというフロー制御は実験を考える上で最も重要なところであり実験を行うにはその設計を避

けて通ることはできず、結果として上位のフロー制御が組み込まれることとなる。

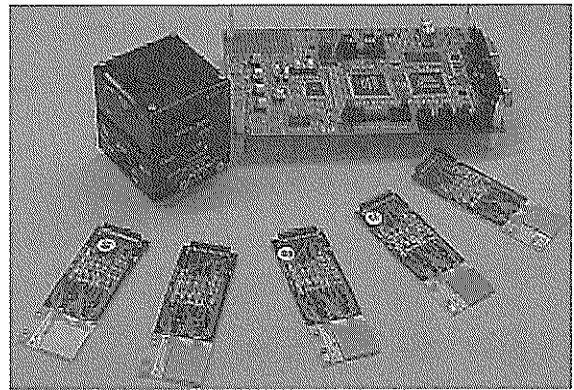
さまざまなシリアルデータリンクが産業界で開発されている。それらは様々な状態に対応するプロトコルが定められている。どんな状態で使われるかわからないので、すべての場合に対応するためフロー制御などは規格に組み込まれているが、残念ながらそれらのプロトコルを実験装置にそのまま使うことはできないことが多い。このためその上にさらにフロー制御を組み込むこととなるが、これが時にはとんでもない現象を引き起こし性能の低下を招くことがある^[7]。SpaceWireは汎用ネットワーク規格と異なり、データ収集システムのようにどうやって使うか良くわかった状態で使う場合に適した規格である。

SpaceWireの規格は小規模なロジックで実現できるためICの中のブロックとの直接のコミュニケーションが可能である。さらに、汎用ネットワークを用いてSpaceWireパケットの転送を行うことにより遠距離からのアクセスも行うことができる。このようにSpaceWireを基にしたシステムはチップレベルから広域ネットまで自由に設計することができる。これはいままでのシャーシに閉じ込められたバスシステムとは質的に大きく異なったシステムの構築が可能になったことを意味する。これにより実験装置を開発するものはその機械的な形態から自由になり装置の機能設計に集中することができる。

SpaceWireを使う上で特記すべき特徴はRMAP (Remote Memory Access Protocol)である。これまでバスシステムが用いられてきたのは技術的な制約があったことだけが理由ではない。バスのマスターがバスにぶら下がったモジュールを自由にアクセスすることは実験装置の制御・診断には不可欠な機能であった。RMAPではパケットのやり取りであたかもバス上のモジュールをアクセスしているかのように自由にアクセスするためのプロトコルである。RMAPは各モジュールの物理的な配置と論理的な配置を独立に設計することを可能とした。もちろん最高の性能を引き出す必要のあるメインデータの流の物理的配置は論理的な配置を考慮して設計される。

RMAPは簡単なパケットのやり取りで実現されており、CPUなどの大規模な論理回路を持たなくとも実現できる。RMAPにより末端のレジスターまであたかもひとつのバスでつながれているかのようになったシステムは制御が容易になったばかりでなく、診断が容易になったことにより、システム試験を効率よく行えるようになる。これにより実験装置で実際にデータを取るまでの開発期間を大幅に短縮することができる。

SpaceWireを使うことでICチップから筐体まで機能ブロックを自由に配置することができるようになった。これにより、実験装置を開発する場合、装置の機能のみを考えて自由に設計できるようになる。我々はSpaceWireを用いたデータ収集システムを構築し気球を用いたX線観測装置の開発を行った^[8]。SpaceWireを用いることによりモジュール化が容易に行われ、開発期間の大幅短縮に成功した。これをもとに科学衛星の観測機器開発への応用を目指し、JAXAと共同で研究開発を進めている^[9]。



JAXA/ISASとの共同開発で開発したSpaceWireを用いた計測エレクトロニクスの試作モジュール (ISAS/JAXA, MHI, ACORAD)^[10]。立方体の箱はSpaceWireインターフェースを持ったコンピュータSpaceCube[®] (JAXA/ISAS, シマフジ電機) JAXA/ISAS提供。

稀な事象を捕まえるには時間がかかる。そのため測定は数年間から時には10年を超えた測定が必要となる。装置の規模が大きくなるに従い、その故障率も重要な要素となる。信頼性の高いシステムを短い開発時間で開発する方法のひとつは、接続を明確に定義した機能ブロックを用いてシステムを構築する

ことである。モジュール間の接続としてSpaceWireを用いることによりおのずと信頼性の高いシステムを開発することができる。SpaceWireを用いることにより、自由にモジュールの物理的形状を選ぶことができるようになったので、我々は新しい規格であるAdvanced TCAの機構部品を用いたデータ収集システムを開発している^[11]。

最先端の物理実験のための実験装置の開発は少量多品種開発の最たるものである。これまでに無かったもの・誰も作れなかったものを1台だけ作る開発である。何台も作りながら改良していくわけにはいかない。ここでもモジュール化が重要となる。1台の装置でも多数使うモジュールはモジュールとして改良を加えていくことができる。

最近のエレクトロニクスの発展の周期の速さは補修部品の確保を困難としている。試作を繰り返してきたモジュールを製作しようとした頃には部品が手に入らないと言うことがしばしば起こってしまう。多数使うモジュールと言っても産業界で言う大量生産からは程遠く、これも少量多品種生産であり、その部品確保は容易ではない。

少量多品種生産をいかにして効率良く行い開発競争に打ち勝つか、産業界では熾烈な競争が行われている。最高性能の実験装置をいかにすばやく開発し測定を行い、成果を出していくか、我々が産業界から学ぶことは多い。

- [1] MOON (Mo Observatory Of Neutrinos) for double beta decay, M.Nomachi et al. Nucl. Phys. Proc. Suppl. 138 : 221-223, 2005
- [2] Improved Measurement of the K^+ to π^+ ν ubar Branching Ratio, E949 collaboration,

Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 031801

- [3] Upgrade of the level-0 trigger system for BNL-E949, T. Yoshioka and E949 collaboration, IEEE TNS 51 : 334 (2004)
- [4] EUR4100e, ESONE committee, 1972, ESONE : <http://esone.web.cern.ch/ESONE/>
- [5] VIPA : <http://www-ese.fnal.gov/vipa/default.htm>
- [6] ECSS-E-50-12A SpaceWire - Links, nodes, routers and networks, <http://spacewire.esa.int/content/Standard/ECSS-E50-12A.php>
- [7] Performance measurement of ATLAS data collection software with QoS. Y. Yasu et al. the 13th IEEE-NPSS Real Time Conference 2003, Montreal, Canada, May 18-23, 2003
- [8] A Data Readout System with High-Speed Serial Data Link for Balloonborne X-ray Detectors, M. Nomachi et al., IEEE The Nuclear Science Symposium, Rome, October 16-22, 2004
- [9] 科学衛星データ処理系の将来展望
高橋忠幸, 笠羽康正, 高島 健, 吉光徹雄, 山田隆弘, 「第五回宇宙科学シンポジウム」研究会収録,
(http://www.astro.isas.jaxa.jp/SpaceWire/index_SpaceWire.html)
- [10] Application of CdTe for the NeXT Mission (Tadayuki Takahashi et al., Nucl. Instr. Meth. A, 541, pp.332-341, 2005)
- [11] Serial Data Link on Advanced TCA Back Plane, M. Nomachi et al., the 14th IEEE-NPSS Real Time Conference 2005, Stockholm, Sweden, 4-10 June, 2005

