

卒業論文

二重ベータ崩壊探索実験 AXEL のための
ファームウェア開発技術の習得

初見聡太

東北大学理学部 物理学科
素粒子・核物理学講座
素粒子実験(加速器)研究室

2024 年 3 月 31 日

目次

1. 目的

2. 序論

2.1 ニュートリノ

2.2 ニュートリノの諸問題

2.3 マヨラナ質量

3. AXEL 実験

3.1 AXEL 実験の概要

3.2 希ガス中の電子の運動

3.3 EL(Electroluminescence)過程

3.4 ELCC(Electroluminescence Light Collection Cell)

3.5 MPPC

3.6 AXEL 実験の現状および今後の計画

4. 開発

4.1 開発環境の整備

4.2 FPGA 講習会

4.3 AXEL BOARD

4.4 京都での作業

5. 今後の展望

参考文献

1. 目的

二重ベータ崩壊探索実験 AXEL(A Xenon ElectroLuminescence)では、検出器として高圧キセノンガス TPC(Time Projection Chamber)を用いている。この実験の特徴はドリフト電離電子を EL(Electroluminescence)過程を用いて増幅している点にある。この EL 光は MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)で検出している。

現開発段階での圧力容器の体積は 180 L であり、1 ボードあたり 56 個の MPPC の波形を読み込むことができる。次世代では体積を 1000 L、チャンネル数を 64ch に拡大する予定であり、それに合わせてデータ読み出し機構を対応させることが要求されている。また、さらに大規模化していくと MPPC 波形の読み出し数が増えるため、大量のデータを効率よく処理することも必要になる。一方、現在の開発段階でも読み出しボードの立ち上げがうまくいかないという問題があり、これに対してはボードを再起動することで対応しているが、手間と時間がかかるため早急なデバッグが求められている。

本研究ではチャンネル数拡大、大量のデータの処理、読み出し機構のデバッグをするために、FPGA を用いたファームウェアの開発能力、デバッグ技術を得ることを目的とする。

2. 序論

2.1 ニュートリノ

1930年、パウリは電荷を持たず、反応性が低く、軽い粒子が存在することを予言した。彼は、ベータ崩壊で発生する電子が持つ連続したエネルギー分布を、原子の結合エネルギーを電子だけでなくこの中性粒子にも分けているためであると考えた。1934年にはフェルミがベータ崩壊の理論を完成させ、その存在が受け入れられていくと同時にフェルミが用いたニュートリノの名が広く用いられるようになった。

ニュートリノは他の粒子とほとんど相互作用しないため、その存在を直接観測することは困難と極めた。1956年、ライネスとコーワンが反電子ニュートリノの逆ベータ崩壊を観測し、ついにニュートリノの存在を実証した。実験から得られた散乱断面積はフェルミの理論から導かれるものと見事に一致していた。それ以降、ニュートリノのヘリシティが左巻きであることや、ニュートリノと反ニュートリノが別の粒子であること、電子ニュートリノのミューニュートリノが別の粒子であることが発見されていった。

現在ニュートリノは、電荷と質量が0で3世代のフレーバーを持つ、弱い相互作用のみで反応するレプトンとして標準模型に組み込まれている。また、質量が0であることから左巻きのニュートリノ、右巻きの反ニュートリノだけが存在するという特徴があり、右巻きニュートリノや左巻き反ニュートリノは発見されていない。しかし、ニュートリノ振動の発見によりニュートリノが質量を持つことが示され、理論上必然的に右巻きニュートリノが要請されるなど、標準模型では説明できない物理学的問題があり解決が待たれている。

2.2 ニュートリノの諸問題

1962年、牧、中川、坂田らはニュートリノのフレーバーは変化するという理論を提唱した。フレーバーの混合が起こることはニュートリノ振動が起こること、そしてニュートリノが異なる質量固有値を持つことと同義である。実験的には、1998年にスーパーカミオカンデが大気ニュートリノの振動を、2001年にSudbury Neutrino Observatoryが太陽ニュートリノの振動の決定的な証拠を発見し、ニュートリノに質量があることが証明された。

一方で、ニュートリノの質量固有値を決定することは未だできていない。それどころかニュートリノの3つの質量固有値が順階層($m_1 < m_2 < m_3$)であるか逆階層($m_3 < m_1 < m_2$)であるかすらわかっていない。

さらに現時点での上限値でも電子の質量の 10^{-6} 倍以下と、他のフェルミオンと比べてニュートリノの質量が極端に軽いことも問題となっている。

2.3 マヨラナ質量

標準模型におけるフェルミオンのディラック質量項は

$$\mathcal{L}_{Dirac} = -m_D \bar{\psi}_L \psi_R + h.c.$$

と表される。ここで、 m_D はディラック・フェルミオンの質量、 $\psi_{R,L}$ は ψ の右巻き成分と左巻き成分である。ニュートリノに関しても右巻きニュートリノ ν_R を導入することで、ディラック質量を得ることができる。しかしニュートリノの質量が極めて小さいことを考慮すると、ニュートリノとヒッグスとの相互作用の強さが他の粒子と比べて不自然なほど小さくなってしまう。

ここで、 ψ と荷電共役 $\psi^c = -\gamma^0 C \psi^*$ (反粒子)との入れ替わりを許す粒子を考える。ラグランジアンが、エルミートかつローレンツスカラーでなければならないことに注意すると、

$$\bar{\psi}^c \psi + \bar{\psi} \psi^c$$

のような質量項を作ることができる。これを $\psi_R^c \equiv (\psi_R)^c$ として左巻き、右巻き成分に分離すると以下の2つの独立な項を得る。

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_R \psi_R^c + h.c. \\ \bar{\psi}_L \psi_L^c + h.c. \end{aligned}$$

これらをマヨラナ質量項と呼ぶ。

ただし、このマヨラナ質量項は一般のフェルミオンには適用することができない。例えばグローバルな位相変換 $\psi \rightarrow \psi e^{i\theta}$ に対してマヨラナ質量項が不変でないため、電荷保存則が成り立たなくなってしまう。マヨラナ質量項を持つためには $\psi^c = \psi$ が必要となる。これはすなわち、粒子と反粒子が同一であることを要請している。このような性質を持つ粒子をマヨラナ粒子と呼ぶ。マヨラナ粒子は標準模型の中には存在せず、実験的に確かめられてもいない。

2.4 シーソー機構

ここで標準模型に右巻きニュートリノ ν_R を導入する。以下ニュートリノがマヨラナ粒子であるとし、簡単のためにニュートリノのフレーバーが1種類であるとする。このときニュートリノの質量項は

$$\mathcal{L}_{mass} = -\frac{1}{2} m_R \overline{(\nu_R)^c} \nu_R - \frac{1}{2} m_L \overline{(\nu_L)^c} \nu_L - m_D \bar{\nu}_R \nu_L + h.c.$$

と書ける。ここで、 $m_{R,L}$ は右巻き、左巻きニュートリノの質量である。ニュートリノがマヨラナ粒子であることに注意すると、 $\bar{\nu}_R \nu_L = \overline{(\nu_L)^c} (\nu_R)^c$ であるので前式は

$$\mathcal{L}_{mass} = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \overline{(\nu_L)^c} & \bar{\nu}_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_L & m_D \\ m_D & m_R^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ (\nu_R)^c \end{pmatrix} + h.c.$$

とも書ける。今、 $m_L = 0$ とすると上式の質量行列は

$$M_\nu = \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix}$$

となる。この行列の固有値を m_s, m_a ($m_s > m_a$)とし、 $m_R \gg m_D$ を仮定すると、

$$m_s \cong m_R, \quad m_a \cong \frac{m_D^2}{m_R} \ll m_D$$

となる。これより、ニュートリノのディラック質量 m_D が他のフェルミオンと同程度であるとき、右巻きニュートリノの質量 m_R が非常に大きければ、左巻きニュートリノの m_R は極めて小さくなることがわかる。一方が重くなるともう一方は軽くなることから、この機構はシーソー機構と呼ばれる。

2.5 レプトジェネシス

現在の宇宙は物質が優勢であるが、宇宙最初期には粒子と反粒子が同数であったと考えられている。この非対称性を説明するモデルの一つとしてレプトジェネシスと呼ばれるものがある。

1967年、サハロフは物質優勢宇宙が誕生するための3条件を定式化した。

- ・バリオン数を破る過程が存在すること
- ・CおよびCP対称性を破る過程が存在すること
- ・上記二つの過程が熱的非平衡な状態で進行すること

二つ目の条件の過程は1964年に発見されている。また、ビックバン理論より三つ目の条件も満たしている。残りのバリオン数の破れは重いマヨラナニュートリノの存在によって説明できる。重いマヨラナニュートリノはヒッグス粒子とレプトンあるいは反レプトンに崩壊する。この崩壊確率には非対称性があり、生成したレプトンがスファレロン過程によりバリオンに変換されることで、現在の物質優勢宇宙が完成したと考えることができる。

このように、重いマヨラナニュートリノの崩壊の非対称性から物質優勢宇宙を説明するモデルをレプトジェネシスと呼ぶ。ニュートリノのマヨラナ性の検証は物質優勢宇宙の起源を解明するためにも重要な課題である。

2.6 ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

二重ベータ崩壊とは、1つの原子核内で2つのベータ崩壊が同時に発生し、2つの電子と2つの反ニュートリノが放出される現象である。親核の結合エネルギーよりも原子番号の1つ大きい原子核の方が結合エネルギーが小さく、原子番号の2つ大きい原子番号の方が結合エネルギーが大きい場合にのみ発生する。現在までに、12種類の原子核で二重ベータ崩壊が実験的に確認されているが、それらの半減期は非常に長いために研究が進んでいない。

もしニュートリノがマヨラナ粒子であれば、ごく稀に2つの電子は放出されるがニュートリノは放出されない二重ベータ崩壊も起こる。これは一方で放出された右巻き反ニュー

トリノがマヨラナ性により、もう一方では左巻きニュートリノとして吸収されることによって起こる。すなわち、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊を観測しさえすればニュートリノがマヨラナ性を持つことを証明できるのである。さらに、 $0\nu2\beta$ 崩壊の半減期からニュートリノの質量も求めることができる。

$2\nu2\beta$ 崩壊と $0\nu2\beta$ 崩壊は2つの電子の運動エネルギーの和を測定することで区別することができる。前者は、原子核の結合エネルギーがニュートリノにも分け与えられるため、電子の運動エネルギーの和はなめらかな分布を持つ。一方で、後者では原子核の結合エネルギーのほとんどすべてが電子に与えられるため、エネルギー和はピーク構造を持つ。

3. AXEL 実験

3.1 AXEL 実験の概要

$0\nu 2\beta$ 崩壊を探索する上では以下の3つの要素が重要となる。

- ・大質量の崩壊核の利用
- ・低バックグラウンド
- ・高エネルギー分解能

ベータ崩壊が起こる確率は非常に低いため、大量の崩壊核を用いることによって $0\nu 2\beta$ 崩壊が発生する可能性を上げることが重要である。1年ほどの観測で高い感度を得るためには、最低でも1トンの崩壊核質量が必要となる。また、バックグラウンドやエネルギー分解能は、ピーク構造を明確にし、 $0\nu 2\beta$ 崩壊以外の事象との区別するために欠かせない性能である。

AXEL 実験ではこれらの条件を達成する高圧キセノンガス TPC(Time Projection Chamber)を開発している。TPCとは、媒質を検出器内で発生した高速荷電粒子によって電離させ、その電離電子を電場を用いて検出面までドリフトさせて検出する装置である。検出面への到達位置やシンチレーション光との到達時間の差を用いて3次元的な飛跡を、また到達した電子の数を数えることで高速荷電粒子が検出器内で落としたエネルギーを測定することができる。

TPCの媒質には二重ベータ崩壊核であるキセノン136を用いる。媒質が気体であることと後述のELCCが強固な構造を持つことから、AXEL検出器は比較的容易に大型化することができる。検出器サイズを大きくし、高圧ガスを用いることで、高頻度の二重ベータ崩壊の発生と低バックグラウンドを実現することができる。また、発生した電子は即座に周囲のキセノンと反応するため、エネルギーロスなく信号を検出できる。加えてキセノンは最初に発生する電離電子数のゆらぎが非常に小さいため、エネルギー分解能が優れた検出器を作成可能である。

3.2 希ガス中の電子の運動

電場のかかった希ガス中では、電離電子は電場と逆向きに加速される。このとき個々の電子に着目すると、常に加速度運動しているわけではなく、希ガスの密度に応じたある一定の距離ごとに希ガスとの衝突が発生する。このため、電子の移動速度は大きくなり続けることはなく、電子全体としてはある一定の速さ(ドリフト速度)に収束する。

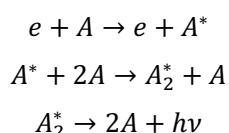
また、電子は希ガスとの衝突の際、さまざまな方向に散乱される。このため例えば点状に発生した電離電子群であっても、電場に沿って移動する間に必ず広がりを持ってしまう(拡散)。電子がヘリウムのように比較的軽い原子と衝突したときには、衝突後の電子の運動エネルギー

ギーは比較的小さくなるが、キセノンのような重い原子と衝突すると、エネルギーの移行がほとんど発生しないため、電子は運動エネルギーを保ったままその運動方向のみが変化するので、拡散が大きくなる。拡散が起こると飛跡がぼやけたり、少数の光子しか入射しないMPPCが増えたりと、バックグラウンドと信号事象の区別がつきにくくなる。

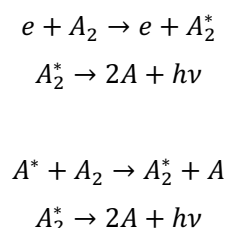
希ガス中にかける電場を大きくしていくと、希ガスとの衝突の合間に電子が受け取るエネルギーは徐々に大きくなる。電子のエネルギーが閾値を超えると、非弾性散乱が発生するようになり、希ガス原子の励起や電離が起こり始める。

3.3 EL(Electroluminescence)過程

励起された電子が脱励起する際、常圧から 3×10^6 Pa 程度の希ガスでは、通常のシンチレーション発光過程とは異なる、以下のような発光過程が支配的となる。



この過程を EL 過程と呼ばれ、放出される光子は EL 光と呼ばれる。EL 光の波長はおよそ 150~180 nm であり、真空紫外光と呼ばれる領域の光である。またキセノンのような重い希ガスでは、30 気圧を超えると二量体を形成し始めるために、以下のような過程も発生する。



これにより光量は増加するものの、二量体が EL 光を吸収することがあるため、取り扱いが難しくなる。

EL 過程はある閾値(キセノンでは約 750 V/cm/atm)を超える電場をかけると発生し、EL 光の光量は電場の強さや電場のかかっている距離に比例する。経験的には常温のキセノンの EL 増幅率 Y [photons/electron/cm]は圧力 P [bar]と電場 E [kV/cm]を用いて以下のように表される。

$$Y = 70 \left(\frac{E}{P} - 1.0 \right) P$$

すなわち、1 kV/cm/bar を超える程度の電場をかけると、1つの電子に対して複数の光子を発生させることができるのである。ゆえに、EL 過程を通じて電子を光子数に変換し、増幅できるのである。

EL 過程よりも強い電場をかけるとアバランシェ過程と呼ばれる現象が起こる。強い電場

で加速された電子が、原子を電離し新たな電子を発生させることで、雪崩的に電子数が増倍される。アバランシェ過程はガス検出器で一般的に用いられている方法で、微小な信号を大きく増幅できるという利点を持つが、初期の増幅ゆらぎがそのまま増幅されることによって、最終的に得られる電子数も大きくゆらいでしまうという欠点を持つ。一方 EL 過程は、ドリフト電子数が変化しないため、非常に高精度な増幅を行うことができる。

3.4 ELCC(Electroluminescence Light Collection Cell)

AXEL 実験の特徴はドリフトさせた電離電子を ELCC で検出する点にある。ELCC とは、AXEL が独自に開発している検出器であり、規則的に穴が空いた PTFE の板と、それを挟み電場をかけるための 2 枚の電極、そして 1 つ 1 つの穴に対応して取り付けられる光検出機 MPPC からなる。

2 枚の電極間にドリフト電場よりも大きな EL 電場をかけることで、電気力線を穴の中に引き込み、電離電子を収集することができる。電子は穴の中で加速され、EL 過程により高精度で光子に変換される。この光子数を MPPC でカウントすることで、キセノンの高いエネルギー分解能を保ったまま、信号を読み出すことができる。

3.5 MPPC

EL 光はシリコン半導体型検出器 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)で測定している。MPPC とは、APD(Avalanche Photo Diode)とクエンチング抵抗を直列接続したものを 1 つの単位(ピクセル)とし、多数のピクセルを並列に接続したものである。MPPC は低電圧で動作し、増倍率、検出効率が高い上に、時間分解能に優れている。また、磁場の影響を受けない利点もある。

MPPC の欠点としてダークノイズが多いという点が挙げられる。半導体のバンドギャップが非常に小さいため、熱ゆらぎによって電子が励起されやすい。これによって生じる信号をダークカレントと呼び、約 1 MHz の頻度で発生する。一方で、このダークカレントは MPPC の増倍率の安定性を確認するのに使用できる。MPPC の出力は周囲の温度や電源電圧のゆらぎに対して非常に敏感であるので、ダークカレントを用いれば電源電圧や入射光子数の監視を行うことができる。

3.6 AXEL 実験の現状および今後の計画

AXEL 実験は、現在 180L の試作機を用いて研究開発を行っている。1 ボードあたりに読み込める MPPC の数は 56 ch である。

また、180 L 試作機の性能評価と並行して 1000 L 検出器の開発が進められている。この次世代検出器では、読み込む MPPC 波形を 1 ボードあたり 64 ch に拡大する予定である。検出器は 2025 年度に神岡鉱山地下に設置され、0v2 β 崩壊事象の探索が行われる計画である。

4. 開発

4.1 開発環境の整備

FPGA ファームウェアの開発は Xilinx 社の Vivado を用いた。

研究にあたって、個人所有のノートパソコンと研究室のデスクトップパソコンの2つの環境にて開発ができるようにセッティングした。Vivado は現在、Windows 版と Linux 版が配布されている。個人所有のパソコンには Windows 版、研究室のパソコンには Linux 版をインストールした。

個人所有のノートパソコンは MacBook であるため、まず Windows をインストールする必要があった。Intel の CPU であれば Boot Camp で Windows をインストールすることができるが、Apple シリコンが搭載されている Mac では Boot Camp が使えないため、仮想環境を用意することにした。ここで用いたのは VMware Fusion ver.13 であり、非商用であれば無料で使用することができる。快適に操作するために、設定ではプロセッサコアをデフォルトの2個から4個に、メモリを4096 MB から8192 MB に変更した。

続いて Windows 11 をインストールした。マイクロソフトからファイルをインストールしてディスクまたはイメージからインストールとしてもよいが、図1の Microsoft から Windows を取得を選択するのが速い。



図1：VMware のインストール方法選択画面

インストールが完了した後、Windows のセットアップが始まったが、ネットワーク接続画面から進まなくなった。そこで、「shift」+「fn」+「F10」を入力してコマンドプロンプトを起動し、oobe¥BypassNPO.cmd を入力した。再起動の後、ネットワークに接続していませんを選択し進めた。次に、VMware Tools をインストールした。set-up からはインストールできなかったため、Windows PowerShell(管理者)に Set-ExecutionPolicy RemoteSigned を入力後、仮想マシンから VMware tools のインストールを選択(図 2)、フォルダーを開いてファイルを表示したのちに、set-up を右クリックして PowerShell で実行してインストールした。

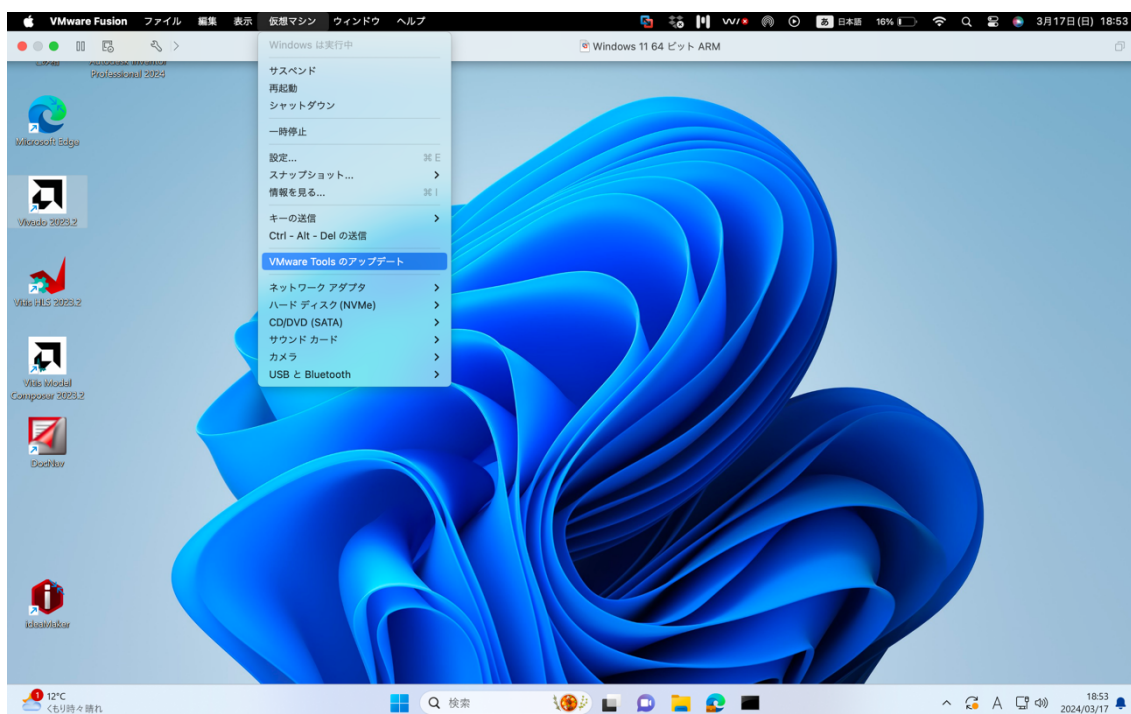


図 2：VMware Tools のインストール画面。図中ではアップデートとなっている。

その後、インターネット接続の設定をした。VMware では、急にネットが繋がらなくなることがある。その場合には、仮想マシン、設定、起動ディスクと進み、デバイスを追加でネットワークアダプタを追加すると解決する。

続いて、Vivado を入れようとしたが、インストール先の容量が足りないと言われた。まず仮想ハードディスクを 100 GB にしたが、それでは拡張されていないようであった。そこで、ハードディスクのバスタイプを SCSI から NVMe へ変更したところ、無事に拡張ができ、Vivado2023.2 をインストールすることができた。

研究室のパソコンは当初、Windows 版を入れる予定であった。研究室のパソコンは何台かあったが、どれも Windows 11 が要求するスペックに対応しておらず、起動することがで

きなかった。そのため、Windows 版を諦め、Linux 版を使うことにした。パソコンに CentOS 7 をインストールし、インターネットに接続した。その後、Vivado2023.2 をインストールした。Linux 版の場合、ケーブルドライバーを別にインストールする必要があった。これは `data/xicom/cable_drivers/lin64/install_script/install_drivers` にある `install_drivers` を実行することでインストールできる。なお、Vivado のインストールができて、実際に動かすためには Vivado/2023.2 にある `settings64.sh` を起動する度に実行しなくてはならない。そのため、`.bashrc` に書き込み OS 起動時に実行されるようにした。加えて、デスクトップにショートカットも作成した。

4.2 FPGA 講習会

環境が整ったところで、Open-It 主催の FPGA 講習会の内容を進めた。最初に 2 つのスイッチで動作する `and`、`or`、`nor` 回路をノートパソコン上で作成した。HDL 入力、RTA 解析、シミュレーションを問題なく経た後、モジュールを FPGA へダウンロードしたが動かなかった。これは Mac との相性が悪いことによるものと考えられたので、デスクトップパソコンで同様のものを作成した。こちらはシミュレーションがうまく動かなかった。原因は `gcc` が入っていないことであった。`gcc` を入れると、シミュレーションは正常に動作した。しかし、今度は今までできていた論理合成ができなくなった。`gcc` を入れた以外に変更した点はなかったので、それが原因であると思われた。そこで、Vivado を再インストールすることにした。その結果、論理合成が再びできるようになった。続いてモジュールを FPGA へダウンロードしたがやはり動かなかった。これは FPGA 講習会で用いていた FPGA と勉強用の FPGA が異なり、ピン配置も異なることが原因であった。そこで、対応するピン配置を調べて修正したところ正常に動作した。

その他にも、4 つのスイッチで入力した 2 進数値を 7 セグに表示する回路、ボタンを押すと 100 MHz の CLK と同期して 29 bit 後 ($2^{28} \times 10 \text{ ns} \sim 2.7 \text{ 秒}$ 後) に LED が点灯する回路、CLK を 200 MHz として 29 bit 後 ($2^{28} \times 5 \text{ ns} \sim 1.3 \text{ 秒}$ 後) に LED が点灯する回路、ボタンを押している間 7 セグが CLK と同期してカウントする回路などを作成した。

FPGA 講習会最後の内容は外部メモリーから起動するということであった。資料によると Add Configuration Memory Device でモジュールを書き込めるとあったが、それは選択できなかった。これに対して 2 つの方法で解決した。1 つは Memory Device を右クリックし、Program Configuration Memory Device を選択する方法で、もう 1 つは Remove Configuration Memory Device を選択する方法である(図 3)。後者を選択すると、Add Configuration Memory Device が出ることから、Memory Device に前の記憶が残っていると Add Configuration Memory Device を選択できないと考えられる。

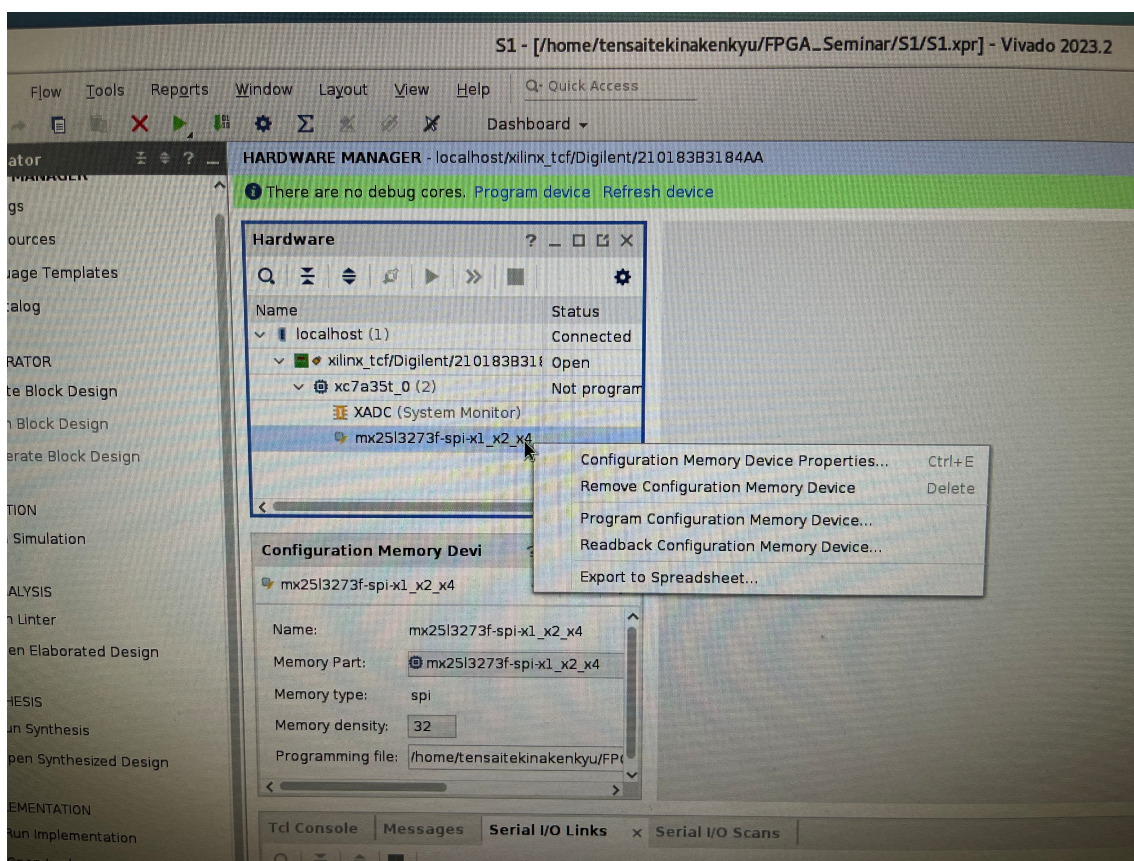


図 3 : Add Configuration Memory Device を選択できないときの書き込み方法

4.3 AXEL BOARD

Vivado が使えるようになってきたので、次は実際に AXEL BOARD に触れることにした。BOARD を動かすにあたって、BOARD と J-tag で接続する LED インジゲータと BOARD の電源ケーブル、そして BOARD を固定する支柱を作成した(図 4)。LED インジゲータは FEB と UDP 通信の状態を 4 ビットの信号で表すものである。BOARD の支柱は 3D プリンタで作成した。

これらと並行して AXEL で使用しているモジュールの勉強も進めた。まずシミュレーションを試みたが、'DIP' is not found for implicit .* port connection とエラーが出て動かなかった。これはすなわち、モジュールで*と書いて省略しているところを明言しないといけないとのことであった。そこで、FPGA 講習会で作成したシンプルなモジュールで*を使用してみたが、同様のエラーが出てシミュレーションができなかった。しかし、論理合成と実装はできた。この原因は Verilog と System Verilog を区別していなかったことにあった。講習会では Verilog を用いていたが、*は System Verilog でないと使えなかった。System Verilog に変更したところ問題なくシミュレーションできた。しかし、AXEL BOARD のモジュールでは no matching signal 'TrigFromRBCP' for .* connection、failed synthesizing module 'SPI_CONTROLLER'、failed synthesizing module 'main' とエラーが出てやはりできなかった。

た。原因は Vivado の Version が 2023.2 であることであった。Version が変わると発見されたバグや怪しい箇所が修正されて新たなエラーが出ることもある。モジュールが書かれた Vivado 2018.3 に変更するとこのエラーは出なくなったが、違うエラーが出た。これは今後対処していく予定である。

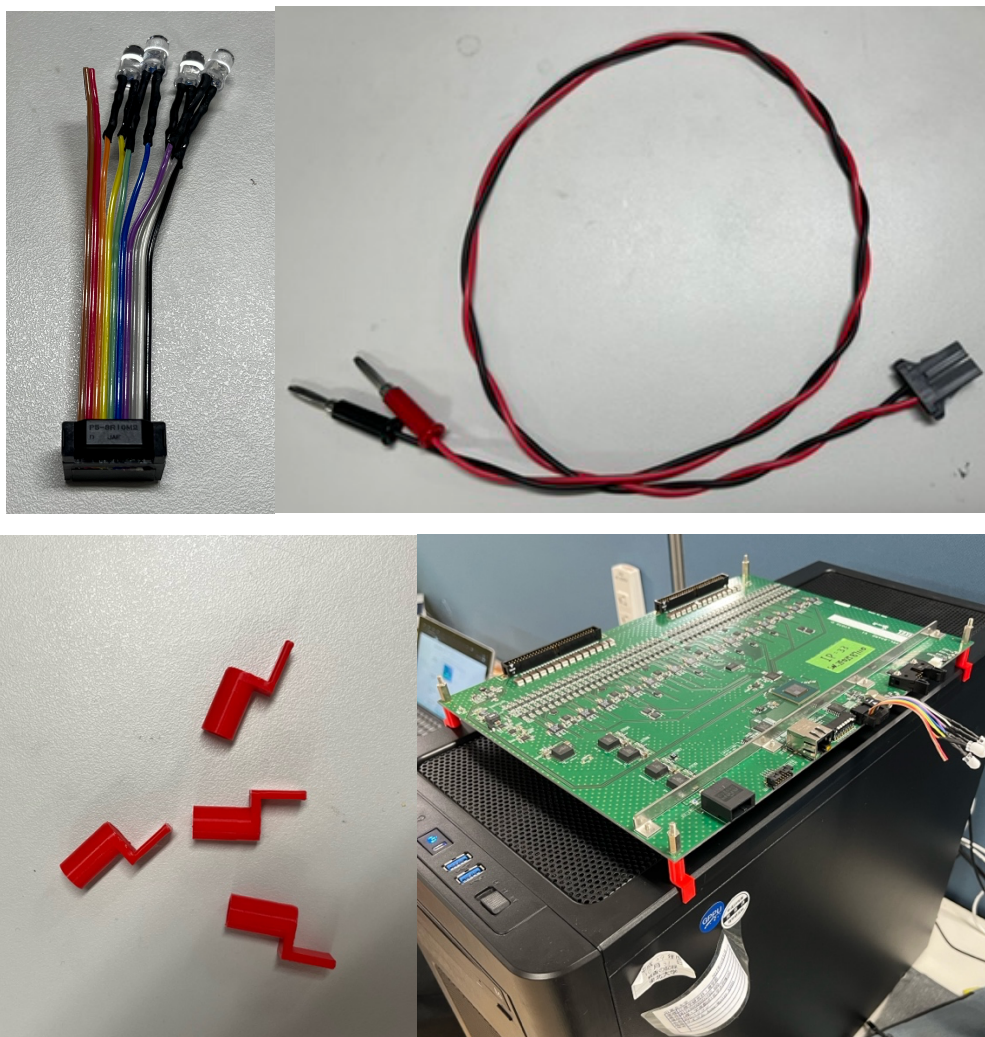


図 4 : LED インジゲータ(左上)、電源ケーブル(右上)、支柱(左下)、支柱の使用例(右下)

4.4 京都大学での作業

BOARD の扱いに慣れてきたところで、2/27~3/1 の期間、坂本宏先生のもと、AXEL 検出器がある京都大学にて作業をした。まずボードを起動する際に問題が起きていることを実際に確認した。完全に電源を落とした状態から BOARD を起動すると、DAQ の立ち上げはうまくいくが、ADCH を取ろうとすると”recv Time out”となり進まなくなる。これは再起動するとうまくいく場合がある。原因を解明するために、ソースコードを読み込んでいくとソフトから ADCH を取るコマンドを送った後に EAGAIN とエラーが出ていることがわか

った。EAGAIN は一時的にリソースが使用不可能となっていることを表している。つまり、パソコンから SiTCP にデータを送るようにコマンドは送信されているのだが、SiTCP はそれに応答していないことが確認された。ここで、立ち上げ時に確認する順番を逆にしてみることにした。通常は ADCH→ADCL の順で確認していたが、逆は試したことはなかった。結果、ADCL には問題なかったが ADCH は立ち上がらなかった。これにより、ADCH に問題があることがほぼ確定した。

考えられる原因は大きく2つ挙げられた。一つは Ring Buffer の読み込み法に起因するものである。High Gain のデータは常に Ring Buffer に記録されている。記録が滞らないように2つのデータ格納場所が用意されており、一方のデータを読み込んでいるときには、もう一方にデータを書き込む仕様になっている。ここで、ボードを立ち上げた際に空である場所を読み込むとエラーが起きるのではないかと考えられる。さらに詳しく知るために、今後トリガーが来たときと TCPSender に送るときのモジュールを見ていく必要がある。

もう一つは同期回路と CLK のタイミングエラーである。データの送信タイミングは CLK で管理されている。ここでデータを送る時間が CLK 周期より時間がかかっているとエラーが出る。これに関しては、まずモジュールの論理が正しいかチェックした上でそれぞれの機能がどのタイミングで動いているのか ILA(Integrated Logic Analyzer)を使って調べることが必要である。この際に、各信号の立ち上がり、立ち下がりの前後関係も併せて確認する。

さらに、一朝一夕で解決できる問題ではないのでいくつかの対症療法を考え、実装していくことを検討した。現在、ADCH の取得がうまくいかない場合には、ボード自体の電源を落とし、再び電源を入れて起動をやり直している。この方法は、うまくいくまで繰り返すため時間がかかる。そこで、パソコンから再起動できる機能を実装することが提案された。実装にあたっては、recv Time out が出ているときにも UDP 通信ができているのかチェックする必要がある。それが確認できれば、UDP からコマンドを受け取ったらボードの状態を初期化できる機構を DAQ のソフトに追加できる。後日、東北大学から UDP 通信ができているか確認した。その結果、UDP 通信は実行でき、コマンドを送信することでボードを reset できることも確認できた。しかし、reset は全ボードに対して行われるため、うまくいったボードもうまくいかなくなってしまう可能性がある。対応策は今後考えていく。

他の解決案としては、ファームウェア自身でエラーフラグを立てて初期化できるようにする機構を実装することが提案された。ただ、この方法はファームウェア自身に手を加えることになるため、実験に大きな支障が出る可能性があるとして、次善の案とされた。

5. 今後の展望

まず、前述の対症療法的機能の実装をすることを優先して行う。その後に、データ取得・送信機能（ADCH にデータが入ってきて TCP で送信するまで）のシミュレーションをし、実際にボードを動かして動作を ILA で確認する。180 L 検出器を神岡に運ぶのは 2025 年度の予定である。したがって、デバッグの完了は 2024 年の前半までには完了することを目標とする。

デバッグの完了後は、次世代 1000 L 検出器に向けてファームウェアの 64 ch 対応、そしてデータの圧縮方法の検討、実装を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 林青司：“ニュートリノの物理学 素粒子像の変革に向けて”，サイエンス社（2021）