

高校生のページ

宇宙線による情報システムの誤動作 —メカニズム解明と対策技術の開発を目指して—

情報学研究科 通信情報システム専攻 超高速信号処理分野
橋本昌宜

1. はじめに

AI や IoT (モノのインターネット; Internet of Things) などの発達により、社会はますます情報システムに依存するようになってきています。人命や財産を取り扱う情報システム、さらにはその中核を担う半導体集積デバイス (LSI や VLSI と呼ばれることが多いです) には高い信頼性が求められます。トランジスタの微細化によってもたらされた集積デバイスの極低電力化・極小体積化は、環境に溶け込んで存在に気づかないコンピューティングを実現しつつあります。一方で、トランジスタの微細化が不透明さを増す中、新しい原理に基づいたコンピューティングの模索が続いています。本分野では「コンピューティング基盤を創る」を掲げて、以下の項目に答えるべく研究を行っています。

- 信頼できる高性能コンピュータをいかに設計するか
- 新原理次世代コンピューティングをどう実現するか
- 我々の生活を変えるコンピューティングシステムはなにか

cue46 号の新設研究室の紹介で、それぞれの概要を紹介しましたので、今回は集積デバイスの信頼性に注目し、宇宙線による誤動作問題を取り上げたいと思います。

2. 地上に降り注ぐ宇宙線とソフトエラー

宇宙線は、宇宙空間を飛び交う高いエネルギーを持つ放射線のことで、主な成分は陽子です。原子核は、陽子と中性子と呼ばれる粒子から構成されていて、陽子は水素イオン (H+) です。中性子は原子番号に影響せず電荷を持ちませんが、陽子とほぼ同じ質量を持っており、質量数に影響します (宇宙のスケールから、原子核、陽子や中性子、さらには素粒子までの大きさの違いを直感的に理解する動画を紹介します <https://www.youtube.com/watch?v=44cv416bKP4>)。

宇宙線は、地球磁場の影響で大気圏に侵入はしにくくなっているものの、常時飛来してきています。大気圏に突入した宇宙線は、大気を構成する原子核に衝突し、2次粒子を発生させます。この現象が連鎖的に生じ、大気中で大量の2次粒子が発生する現象は空気シャワーと呼ばれています (図1)。大量発生する2次粒子には、中性子やミュオンが含まれています。ミュオンは電子と同じ電荷量を持ち、

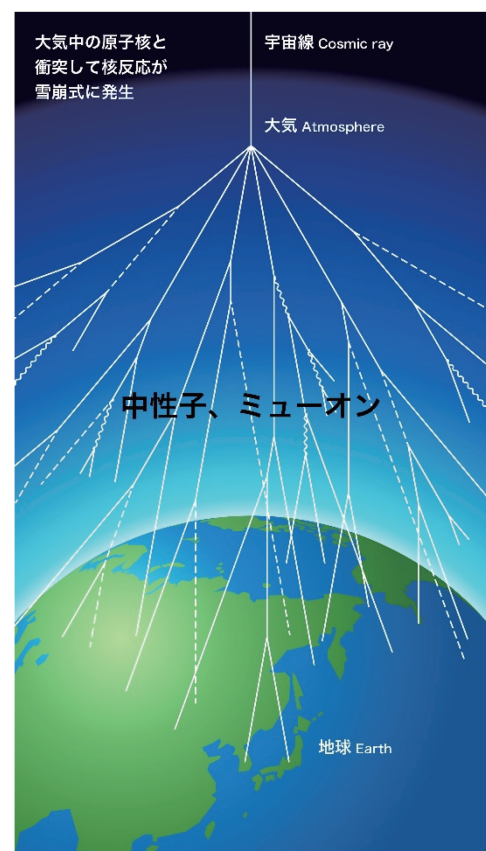


図1：宇宙線と空気シャワー

電子より 207 倍重い粒子です。

中性子やミュオンは高い物質透過性を持ちます。例えば、ミュオンはピラミッドや火山も透過するため、その特性を使って内部構造を調べる取り組みがあります。NHK スペシャルなどでご覧になった方もいるかも知れません。当然、我々の体の中も透過しています。手のひらをかざすと、毎秒 1 個程度の高速な中性子やミュオンが突き抜けています。

一方で運が悪いと（つまり低い確率で）物質中の原子核と中性子やミュオンが相互作用を起こします。同様に集積デバイスを構成する原子核とも相互作用を起こします。一例を図 2 に示します。シリコン原子が中性子と反応し、この例では酸素原子に変化しています。また、陽子や α 粒子（ヘリウムイオン）が生成され、トランジスタ近傍を移動しています。これらの粒子はエネルギーを電子生成に費やして、最終的にエネルギーがなくなって止まります。その結果、粒子が移動した軌跡上の電子の密度が高くなり、トランジスタにノイズ電流を与えます。

集積デバイス中には、デジタルの 0, 1 を覚えておくためのメモリ素子が多数存在します。メモリ素子にはトランジスタが含まれており、先に述べた電流ノイズによって記憶値が 0 から 1 に変わったり、1 から 0 に変わったりします。このように起こる値の反転をソフトエラーと呼びます。トランジスタなどのハードウェアが壊れてしまうのではなく、ただ値だけが全く痕跡を残さず壊れ、その後も動作し続けることができるので、「ソフト」エラーと呼ばれています。

3. ソフトエラーが社会に与える影響

パソコンやスマートフォンでみなさんの写真やメッセージなどのデータはもちろん、プログラムや計算の途中結果などもメモリ素子に置かれます。例えば写真の表示プログラムでは、1 ビットのデータの値が 0 から 1 に変化しても多くの場合は気づかないと思います。一方で、同じ画像を入力としても、自動運転の車が歩行者を見つけるプログラムでは、歩行者の有無を表すデータが間違えると大惨事になる可能性があります。介護ロボットが誤動作すると、人間が怪我をする可能性があります。他にも、銀行口

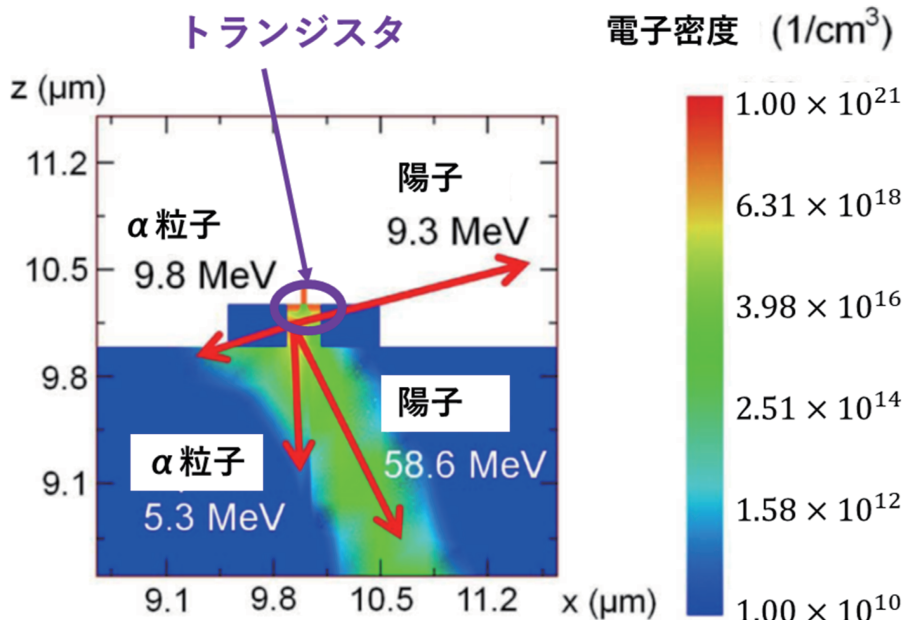


図 2：トランジスタ近傍での核反応例 ($n+^{28}\text{Si} \rightarrow 3n + 2p + 2\alpha + ^{16}\text{O}$)。核反応によって原子番号が変化し、陽子、 α 粒子などが飛散している。陽子や α 粒子によって、トランジスタ近傍の電子の数が増えている。n は中性子、p は陽子、 α は α 粒子、原子番号の左上の数字は質量数。MeV はエネルギーの単位。

座の管理も電子化されていますので、例えば残高が変わってしまうかもしれません。実際に飛行機の急降下事故の要因として、ソフトウェアの影響の可能性が最も高いとした海外のレポートがあります。

情報がオンラインシステム上にあり、それらが連携する社会システムが広がっています。これは高い信頼性で情報システム、さらにそれを構成する集積デバイスが高い信頼性で動作することを前提としています。もちろん、集積デバイスの信頼性が高くても、ソフトウェアにバグがあれば誤動作しますが、高い信頼性を必要とするシステムでは、ソフトウェアも信頼性を高める設計方法が導入されています。一方で、宇宙線を起因とするソフトウェアは確率的に起こる現象で、完全に取り除くことができません。例えば、なにかの材料で覆って中性子やミューオンが入ってこないようにしようとしても、高い物質透過性を持っているので効果がほとんどありません。したがって、確率は低いもののエラーが起こる前提で高信頼システムを設計する必要があります。

ここで、確率の低さには注意が必要です。例えば1台のコンピュータに注目すると10年に一度しかソフトウェア起らない場合でも、10万台のコンピュータが動作していると、1時間に一度はいずれかのコンピュータにエラーが起こります。スマートフォンだと多くは再起動すれば済む話だと思います(そもそもソフトウェアのバグの影響のほうが大きいと思います)が、大規模なスーパーコンピュータでは、再起動が頻繁すぎて計算どころではなくなってしまいます。実際、スーパーコンピュータではこの問題がよく理解されており、神戸のポートアイランドに設置された京や富岳などでも最後に紹介するエラーを訂正する設計が取り入れられています。他にも、多数あるネットワーク通信装置で、ソフトウェアが原因の誤動作が頻繁に起こっていることも新聞報道されました。

4. ソフトエラーの評価方法の研究

ソフトウェアは不可避の問題ではあるものの、確率が低いのも事実であり、社会の脅威となるかは、慎重に見極める必要があります。この見極めには、実際に大量の粒子からなるビームを集積デバイスに照射する加速試験が一般に行われます。図3に実際に我々が実験を行っている一例を紹介します。この写真では上部からビームが飛んできます。その軌跡の上にメモリやプロセッサなどを並べて動作させ、エラーの頻度を評価します。

地上に届く中性子は様々なエネルギーを持っています。地上で動作する集積デバイスのエラー確率の評価には、地上のエネルギー分布を持つビームを照射すべきです。しかし、地上のエネルギー分布を持つビームが出力できる施設は世界に4箇所しかありません。これらの施設は物理実験が主目的であり、集積デバイスの評価には不足しています。

そこで、我々は企業や大学、研究機関の方と力を合わせて、地上のエネルギー分布

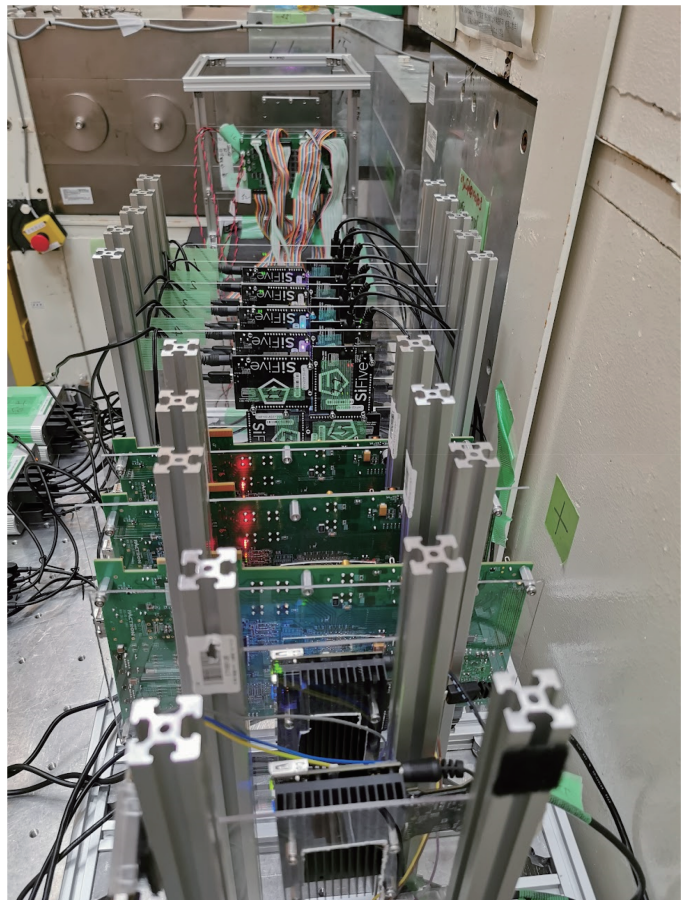


図3：粒子ビームを用いたソフトウェア確率評価実験の実験風景

を持たないビームであってもエラー確率の評価に利用できるようにする手法の開発を進めています。現在は、開発した手法が有効かどうかを、様々な集積デバイスで評価する検証段階にあります。将来的には、世界標準となる評価手法にしたいと考えています。

5. ソフトエラーの動向

集積デバイスは、御存知の通りトランジスタが微細化されることで、性能向上を続けてきました。近年は微細化だけでなく、トランジスタ形状も進化を続けています。ソフトエラーの観点では、トランジスタ形状の変化は、ノイズ電流量の変化や、ノイズ耐性の変化につながるため、常に最新のトランジスタでの状況を把握し、その傾向がシミュレーションで確認できるように調査し続ける必要があります。

トランジスタの微細化は、新たな粒子の脅威を生む可能性があります。冒頭に、中性子とミュオンがソフトエラーを起こすと紹介しましたが、つい最近までミュオンはソフトエラーを起こす要因とは考えられていませんでした。我々のグループが、実験でミュオンがソフトエラーの驚異となりうることを世界に先駆けて確認しました。その後も、微細化したトランジスタへの影響調査や、ミュオンがソフトエラーを起こす現象をシミュレーションで再現する研究を継続して行っており、将来の影響の大きさを明らかにする研究を進めています（図4）。この研究は、理学部の先生や学生との共同研究となっており、理学と工学の興味が重なる面白い研究テーマとなっています。

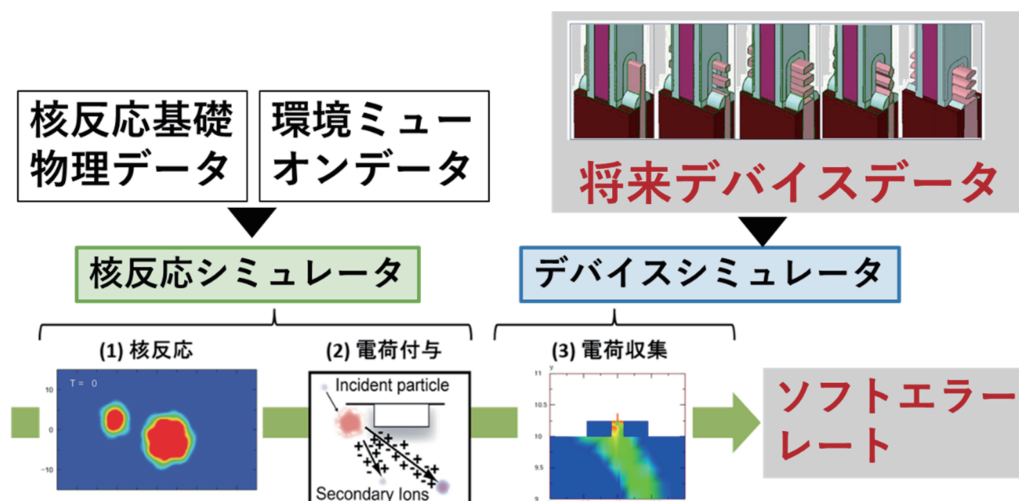


図4：ミュオンによるソフトエラーをシミュレーションで再現し、将来動向を見極める研究

6. 今後の展開

最初に説明したようにソフトエラーは集積デバイス中に必ず発生します。したがって、エラーが発生してもシステム全体が問題を起こさないようにする必要があります。例えば、集積デバイス内では、エラーを見つけたり訂正したりできるエラー訂正符号の利用がメモリに対して進められています。しかし、エラー訂正符号が適用できない回路部分も多く存在します。ソフトエラーがシステム内をどのように伝搬するのかを把握し、エラーをいち早く見つける技術が求められています。これらの技術開発は、集積デバイスの中だけでなく、オペレーティングシステムやソフトウェアとも強調して進めていく必要があります。一方でこれらのエラー対策技術は性能を低下させたり、製品コストを上昇させたりする要因となります。我々も組み込みプロセッサやGPUと呼ばれる並列プロセッサに注目して、エラーを素早く効率よく見つける方法の開発を進めています。必要十分な対策が施された安全安心な社会システムの実現に向けて、研究活動を今後も進めていきます。