

粒子反応トポロジー測定による中性子イメージング法の開発



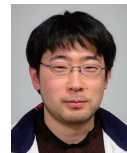
谷 森 達

京都大学大学院理学研究科
tanimori@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp



Joseph Parker

総合科学研究機構
中性子科学センター
j_parker@cross.or.jp



高 田 淳 史

京都大学大学院理学研究科
takada@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

放射線検出器は約 120 年の歴史があるが、検出原理はあまり変わっていない。放射線が物質中で起こすエネルギー損失を、電離損失またはシンチレーション等の発光現象を通して測定する。一方、放射線と物質の相互作用によって、入射粒子の方向・粒子識別等の情報が反応の幾何学的構造として残されている。反応の 3 次元計測によって初めてこれらの情報が得られる（**トポロジー計測法**）。そのような情報はわずかに写真乾板や霧箱等で測定されたが、広く利用されることはなかった。近年、素粒子や原子核と物質の相互作用の研究は大きく進歩し、粒子反応の 3 次元測定が不可欠となり、現在は一般的な実験手法となった。ただそのような実験には複数の装置を組合せた大規模な装置が必要である。

様々な放射線計測において 3 次元計測ができれば、困難な放射線の方向測定や粒子識別が高精度で実現できる。しかし放射線のエネルギーは MeV 程度と低く、固体中での飛跡は μm 以下のスケールとなり困難である。それを可能にする検出器は 1970 年代に登場したガス **Time Projection Chamber** (TPC) である。ガス槽と 1 枚の 2 次元検出器のみで 3 次元計測を実現した。この画期的な手法はそれ以後、素粒子原子核実験の中心的飛跡検出装置として広く用いられている。ただ TPC は多くの信号処理を必要とする大型装置であり、小型の放射線検出器に導入できるという考えはなかった。

希薄なガス中では放射線の飛跡もミリメートルスケールに拡大され、原理的に TPC で 3 次元計測が可能となる。我々は 2000 年当時、サブミリメートル間隔で信号が得られる新しいガス増幅位置検出器

Micro Pattern Gas Detector (MPGD) の開発中に、簡単な回路で微弱な α 線飛跡が検出できることを見出した。この発見をもとにして、すぐさまガンマ線コンプトン散乱の 3 次元計測用に MPGD を用いた TPC (μTPC) を開発した。世界初の電子式霧箱の実現である。ディスプレイ上に霧箱同様のジグザグな β 線飛跡のトポロジーが見えたときの感動は忘れられない。

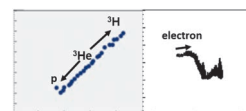
この時期、大強度放射光の利用拡大や医療での X 線・ガンマ線診断等で放射線イメージングが大きく発展した。さらにダイナミクスを捉えられる時分割イメージング技術も出てきた。そのようななか、新しいプローブとして J-PARC 大強度中性子利用が提案された。中性子は X 線の苦手の軽元素に強く反応する等の特徴を活かし、タンパク質の物質構造解析や生命分野での利用が期待された。特にパルス中性子源を使えば、中性子飛行時間からエネルギー弁別や時分割イメージングが可能となる。このため J-PARC での中性子イメージング利用が非常に期待された。一方成果を得るためには中性子源から大量に発生するガンマ線の除去、中性子飛行時間計測、さらに X 線同等の高位置分解能・高計数率が求められ、その実現は困難と思われた。

我々は全く異なる宇宙線物理で開発した μTPC を利用し、熱中性子と ^3He による (n, p) の反応のトポロジー計測を行うことで、これら要求の大半を満たす画像装置 μNID ($\mu\text{-PIC-based Neutron Imaging Detector}$) を短期間で実現した。現在多くの利用者に利用され新しい中性子イメージング解析の成果が出てきている。

用語解説

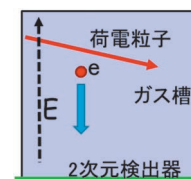
トポロジー計測法：

トポロジーは「図形の空間的位置関係の機能」という意味がある。粒子反応では、飛跡の幾何構造から一瞬で反応の特徴が把握できる。例えば下図のように $^3\text{He}(n, p)$ 反応後の崩壊粒子飛跡は直線状となり、雑音ガンマ線によるコンプトン電子はジグザグの飛跡となり簡単に判別できる。これをトポロジー計測と命名した。



Time Projection Chamber：

下図のようにガス槽に一樣な電場があり、一端に 2 次元ガス検出器がある。入射粒子はガスを電離、電離電子は電場 (E) に沿いドリフトして 2 次元検出器に到着。2 次元位置情報と到着時間を測定する。電子到着時間とドリフト速度から荷電粒子の電場方向の位置も得られる。



Micro Pattern Gas Detector：

微細加工技術により基板上に細線・微細穴・柱を多数構築し、ワイヤー比例計数管と同様な高電場を作りガス増幅作用を行う。電極は $100\ \mu\text{m}$ スケールで製作可能なため、ワイヤー型より格段に高い位置分解能・高計数率が得られる。