



## アクティブ・ガス標的 (Active gaseous target)

鈴木 大介

理化学研究所仁科加速器科学研究センター

不安定核実験は、常に統計量との闘いです。アクティブ・ガス標的は、この闘いを革新した分光装置です。

核反応実験には、ルミノシティと呼ばれる量があります。標的の単位面積当たりの数( $N_{\text{target}}$ )とビームの単位時間当たりの強度( $I_{\text{beam}}$ )の積( $L = N_{\text{target}} \times I_{\text{beam}}$ )で定義されるこの量は、単位時間・単位断面積あたりに発生する核反応のイベント数を表します。定義は至って単純明快ですが、その意味するところは深刻です。ルミノシティが低い限り、いくら人知を尽くしたところで断面積の小さな反応は測定できない、のですから。そして、このルミノシティを1桁あげるには、現実世界では大変な困難を伴います。まず、ビーム強度を1桁あげるのは、施設の大幅改良でもしない限り無理でしょう。それなら標的を厚くすれば良いではないか、ということになりますが、話はそう単純ではありません。反応に関与する荷電粒子が標的中でエネルギーを失うからです。これがエネルギー分解能を悪化させます。というのも、標的中で損失したエネルギーは普通の標的では測定も補正もできないからです。特に影響が大きいのは、欠損質量法という手法による分光です。この手法では、散乱核の励起エネルギーを、反応前のビームと反応後の標的粒子のエネルギーから求めます。厚い標的はエネルギー分解能を損ない、薄い標的はルミノシティを低下させます。不安定核の欠損質量分光は、極めて難易度の高い手法でした。

アクティブ・ガス標的が画期的だったのは、この不安定核分光におけるエネルギー分解能の問題から、標的の厚さを切り離すことに成功したからです。このことがルミノシティを1桁以上あげることを可能にしました。アクティブ・ガス標的の構成と原理は、次のようになります。まず、標的としてガスを用意します。幸い、直接反応に多用される標的(陽子、重陽子、ヘリウム等)は、ガス状態で用意できます。次に、標的ガスを、Time Projection Chamber (TPC) と呼ばれるガス検出器の中に導入します。TPCとは1970年代に米国SLACで開発された検出器です。荷電粒子がガス中で描く軌跡を、3次元的に記録することができます。TPCの動作原理を図解したのが図1です。ガスから電離された電子を、電場によって特定の方向に投影し、投影面に映った2次元像の時間発展を追うことで、粒子の軌跡を3次元的に再構築します。アクティブ・ガス標的の発想は、このTPCの動作ガスを同時に反応標的として用いる点にあります。標的中における軌跡、損失したエネルギーを測定できることはもちろん、反応点における粒子のエネルギーを飛程から求めることも可能になります。こうして、もはや分解能に影響しなくなった標的は、自由に

厚くすることができるのです。例えば、陽子との反応を  $\text{CH}_2$  標的で測るとします。欠損質量法で励起状態を分離するには、厚さは  $1 \text{ mg/cm}^2$  程度が限界です。この時、毎秒千個のビーム照射した場合のルミノシティは  $10^4 \text{ mb}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、つまり  $1 \text{ mb}$  の反応は一日平均 10 回しか起こりません。1 気圧  $50 \text{ cm}$  厚の水素ガス・アクティブ標的を用いれば、ルミノシティを 30 倍にできます。

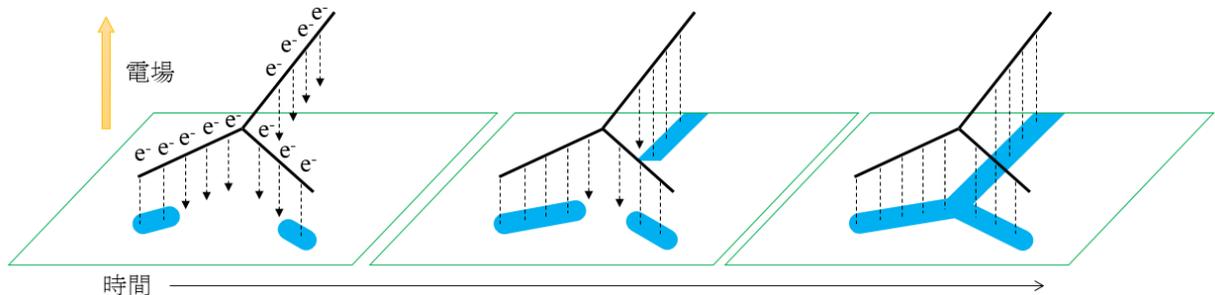


図 1: TPC の動作原理。電場により電離電子を読み出し面へと輸送し、軌跡の投影像を測定する。その時間発展を解析することで、3次元空間での軌跡を再構築できる。

史上初のアクティブ・ガス標的は、70 年代に旧ソ連のグループが開発した **IKAR** だと考えられています。ハドロンの陽子弾性散乱を測定するために、10 気圧近い高圧水素ガスを用いました。不安定核実験で先鞭をつけたのは日本です。ヘリウム・ガスを用いた **MS-TPC** が、**RIPS** において天体核反応  ${}^8\text{Li}(a,n){}^{11}\text{B}$  を測定するために開発されました。しかし、アクティブ標的のもつポテンシャルを十全に開花させ、今日の潮流を築いたのは、仏国 **GANIL** の **MAYA** と言えるでしょう。**IKAR** や **MS-TPC** のようなパイオニア的装置は、ある特定の核反応の運動学に最適化されていました。一方、**MAYA** は様々な運動学に柔軟に対応できる、よりジェネリックな装置でした。核子移行反応や非弾性散乱など様々な反応を使い分け、非束縛な水素同位体  ${}^7\text{H}$  の共鳴状態、 ${}^{11}\text{Li}$  の 2 中性子ハロー、 ${}^{56,68}\text{Ni}$  の巨大単極子共鳴など多様な物理の主題に挑戦し、成果を出しました。

**MAYA** を第一世代とするならば、第二世代に相当するアクティブ標的が、現在世界各地で開発されています。**MAYA** の後継機である **ACTAR**、同じく欧州の **SPEC-MAT**、米国 **NSCL** が主導する **AT-TPC**、国内ならば **CNS** の **CAT** や京都大学の **MAIKo** が挙げられます。これらの次世代装置は、旧世代に比べ、標的が厚く（水素ガスにして  $10 \text{ mg/cm}^2$ ）、空間分解能に優れ（10,000 個を超える読み出し電極）、情報量が多く（波形のデジタル化）、データ取得速度が速い、という圧倒的に優れたパフォーマンスを有します。その飛躍的進化を支えるのは、**Micromegas** や **GEM** に代表される位置感応型のガス検出器技術と、**GET electronics** のような高速波形信号処理回路です。共に、検出器の設計を容易にするジェネリックな技術であり、多様な用途に応じたアクティブ標的が創出される原動力となっています。第二世代のアクティブ標的の本格的な運用とともに、不安定核の核反応研究が大きく前進することが期待されます。アクティブ標的とそれを支える要素技術について、さらに詳しく知りたい方には、レビュー論文[1]をお勧めします。

## 参考文献

- [1] S. Beceiro-Novo, T. Ahn, D. Bazin, W. Mittig: Prog. Part. Nucl. Phys., 84, 124 (2015).