

Saturne 滞在記

日本原子力研究所粒子線工学研究室

明午 伸一郎

e-mail: meigo@linac.tokai.jaeri.go.jp

1. Saturne

Saturne(Laboratoire National Saturne: サチューン国立研究所)はパリ中心部から南西に 21 km 離れた Saclay の中にあり、CEA の DSM(物質科学部)と CNRS(国立科学研究センター)の IN2P3(原子核および素粒子物理学国立研究所) の管理に置かれている。Saturne はフランス語の土星という意味であり、円形のシンクロトロンが土星の輪に似ているところに由来する。最大のエネルギーは 2.6 GeV でパルスあたり強度は陽子で 2×10^{12} 個(ppp: pulse per protons)である。偏極陽子の加速も可能で 80%と世界最高レベルの偏極度が得られる。1978 年から、中間エネルギーの原子核物理の実験が行われたが、1997 年 12 月にシャットダウンした。理由は予算が無いためらしい。Saturne の加速器は非常に安定しており、運転中にほとんど停止することはなく、わずか 1 時間程度でビームエネルギーとビーム輸送の変更ができた良いマシンであった。こんなに良いマシンがシャットダウンするのは非常に残念である。

Saturne では消滅処理の基礎データ収集のために、(p,xn)反応の二重微分断面積測定と入射粒子の飛程よりも厚いターゲットから生成する中性子スペクトル測定が行われた。この実験は Saturne の内部では、“Transmutation”と呼ばれていた。93 年頃から 95 年までの間に phase1 として(p,xn)反応の 0° のみの微分断面積の測定を行い、その後は phase2 の測定として、ビームポートを移転して $0^\circ \sim 160^\circ$ における二重微分断面積測定を行った。筆者は Saturne に、97 年の 4 月から 11 月まで滞在し、(p,xn)反応の二重微分断面積測定と厚いターゲットから生成する中性子スペクトル測定に参加した。

2. 実験

実験には、Bruyères-le-Châtel, Saturne および DAPNIA(宇宙物理、素粒子物理および原子核物理部)の SPHN(原子核物理部)からの総勢 20 名が参加した。筆者を含めたわずか 3 人が外人であったので、公用語はフランス語であった。毎週木曜には実験の打ち合わせがあり、フランス語の良い勉強になったが、わからないことは打ち合わせ終了後に聞かなければならなかった。何とか最後には日常的な会話は理解出来るようになったが、会議中の流れるようなフランス語は最後までわからなかった。一回の実験は 1

週間程度の期間で行われ、8時間のシフトを組んで測定を行った。

2-1 ターゲットとビーム条件

0.8, 1.2, 1.6 GeV に加速された陽子を薄いターゲット(Al, Fe, Zr, W, Pb, Th)に入射し、(p,xn)反応の微分断面積を測定した。ターゲットはコリメータホール付きのコンクリートブロックで覆われ、床散乱によるバックグラウンド中性子を低減するようになっていた(図1)。飛程よりも厚いターゲットの場合には、ターゲット(Al, Fe, W, Pb)はビーム入射軸方向に動かすことが可能な架台上に置かれ、中性子スペクトルの放出位置の依存性を測定した。

入射陽子ビームのパルスは、時間幅が 0.2 m 秒、繰り返し周期が 1.2 秒であった。パルスあたりのビーム強度は、 $2\sim 6 \times 10^6$ (ppp)であり、プラスチックシンチレータ(NE102A)で一個ずつ数えることが可能である。入射ビーム強度の調整はウランのビームコリメータを開閉することによって行われ、ビーム強度の測定は薄いプラスチックシンチレータを用いて行った。このシンチレータの信号を遅延して飛行時間スペクトルのストップ信号に用いた。磁気スペクトロメータで測定を行う場合には計数率を稼ぐためにビーム強度を 1×10^{10} (ppp)とするので、シンチレータで陽子を一個ずつ数えることができない。このため、マイラーフォイルから反跳する陽子を計数する相対モニターをビームライン上流に置き入射陽子の相対強度を測定した。相対モニターの規格化は炭素板の放射化で行った。ターゲットから 3 m 上流に炭素板を置いて、 ${}^7\text{Be}$ 生成量と C(p, ${}^7\text{Be}$)反応断面積から絶対強度を導出した。この測定方法は Saturne の他の実験でも用いられており、10%以内の精度で測定できるそうである。陽子ビームの形状診断はマルチワイヤーモニターによって行われ、ビームの広がり半値幅において 1.5 cm であった。

2-2 飛行時間測定

中性子の飛行時間スペクトルの測定は中性子と γ 線の弁別を良好にするために二種類の液体シンチレータ(NE213)を用いて行った。5 MeV 未満の低エネルギーの測定には小型のシンチレータ(直径 13 cm, 長さ 5.6 cm)を用い、5 MeV 以上のエネルギー領域には Demon と呼ばれる大型のもの(直径 20 cm, 長さ 16 cm)を用いた。ターゲットから検出器までの距離は 6~8 m であり、 $0\sim 160^\circ$ の 10 角度に対して同時に測定した。コリメータ内の中性子の散乱は薄いターゲットの場合には 2 MeV の中性子に対して、1%以下の寄与しかなく無視できるとされている。しかしながら、厚いターゲットの場合には、中性子が生成される場所が薄いターゲットよりも広がっているためにコリメータ内散乱の寄与は大きくなると予想されたので、LAHET コードを用いてコリメータ内散乱の寄与を評価した。まだ十分な統計では無いものの 14 %以下の寄与であることがわかった。

Saturne の飛行時間測定データの処理では、中性子の検出時間が検出器の出力波高に依存する timing walk 効果を補正していなかったため、この補正を行うように提案した。これを考慮した結果、(p,xn)断面積測定において、飛行時間法で測定したエネルギースペクトルは反跳陽子スペクトロメータで測定した結果と一致するように改善された。データ解析には CERN で開発された PAW(Physics Analysis Workstation) が使用された。PAW は生データのソーティングや補正などに特別なプログラムを作成することなく出来てしまう非常に便利なソフトである。PAW はインターネットで無料で手に入れることが出来る(<http://asdwwww.cern.ch/pl/paw/index.html>)ので、実験解析をやっている人、特にリストデータの処理をやっている人には是非一度試してみることを勧める。慣れるまでは時間が少し掛かるが、一度慣れてしまえば非常に便利なツールである。実験参加者のほぼ全員がこれを解析に使用していた。

2.3 反跳陽子スペクトロメータ

放出中性子のエネルギーが高くなるに連れ飛行時間測定ではエネルギー分解能が極端に悪くなるので、微分断面積の高エネルギースペクトルは反跳陽子スペクトロメータで測定した(図 1)。中性子を液体水素に入射して、生成した粒子をマルチワイヤーチェンバー(MWPC)、プラスチックシンチレータおよび電磁石を用いて、粒子のトラジェクトリーとシンチレータ間の飛行時間の測定を行い、粒子の運動量と種類を導出した。200MeV 以上の中性子に対しては非弾性散乱が生じるために、陽子のスペクトルは反跳陽子よりも低いエネルギーにテール成分を持つので単色な応答を示さない。そこで、 ${}^9\text{Be}(d,n)$ 反応で生成される準単色中性子を利用してスペクトロメータの応答関数を測定し、これを用いてアンフォールディングを行って中性子のスペクトルを導出した。測定で得られたエネルギースペクトルは、 Δ 共鳴と quasi-elastic から生成する中性子のピークが分離できるほど良好なエネルギー分解能であった(図 2)。ところが、測定結果は phase1 と phase2 で食い違う結果になった(図 2)。これは、phase1 の応答関数の測定において入射陽子の強度測定に用いた炭素板がターゲットから遠かったために中性子強度の規格化に問題があったことや、また測定に用いた中性子のエネルギー点が phase2 よりも少なかったことから、この食い違いが生じたと思われる。

スペクトロメータのマルチワイヤーチェンバーの信号の読み出しには LeCroy 社製の PCOS-2 および 3 が用いられ、データは CAMAC-VXI のバスを経て Sun のワークステーションで収集された。この実験で新規に購入されたのは、遮蔽用のコンクリートブロックのみであった。他の物品は色々な研究所(GANIL 等)の借り物であり、こんな環境がとても羨ましく思えた。実は筆者はシャットダウンした後に NE213 を頂こうとしたが、借り物なのでもらえないと言われた。

2.4 液体シンチレータの中性子検出効率

飛行時間測定の実験では中性子の検出効率としては実験値が使用された。その効率の測定は Satume, Bruyères-le-Châtel (仏)及び Uppsala 大学(スウェーデン)で行われ、 ${}^9\text{Be}(d,n), \text{T}(d,n)$ および ${}^7\text{Li}(p,n)$ の中性子源がそれぞれ用いられた。彼らが実験で得られた効率は CECIL コードの計算結果よりも 20%程度大きかったが、CECIL に用いている $\text{C}(n,n'\alpha)$ の反応断面積を Kellog 等の測定値に変更することにより再現できた。筆者も以前に同様な測定を行ったが、測定値は CECIL による計算値よりも逆に 20%程度小さい結果となった。これは、CECIL で使用される $\text{C}(n,\alpha)$ 反応断面積のスペクトル形状に問題があるためである。Satume で使用された NE213 の容器にはプラスチックが用いており、計算ではこれを無視しているために実質上の検出効率が CECIL コードの計算値よりも大きくなって一致したと思われる。なお最終的な検出効率の解析は終了していないが、暫定的な効率を用いた (p,xn) 反応断面積は KEK と LANL の測定値のいずれとも 20%以内で一致しており、検出効率による誤差の寄与はこれ以下と思われる。

2.5 厚いターゲットに入射した場合の測定

厚いターゲットから生成する中性子の暫定的なエネルギースペクトルを用いて、核子・中間子輸送コードシステム(NMTC/JAERI, MCNP-4A)の検証を行った。計算結果は実験値よりも小さくなったが、核子・核子散乱断面積に媒質効果を考慮すると実験値を良く再現することがわかった。この傾向は、筆者らが KEK で行った厚い鉛ターゲットに 0.5, 1.5GeV 陽子を入射した場合の中性子スペクトルの解析結果と一致しており、ほっと胸をなで下ろした。

3. 今後の測定

かつて Saclay では、電子ライナック、タンデムおよびサイクロトロンが動いていたが、現在はどれも停止しており、通りの名前(Rue de cyclotron)だけが残っている。Satume 停止後は動いている加速器が無いために、Saclay の研究者は実験のためにドイツまで行かなねばならない。DAPNIA から参加した研究者達は GSI (Darmstadt) で Pb イオンを液体水素ターゲットに入射して逆反応によって、スポレーション生成物を磁気スペクトロメータで測定している。また、Satume で使用した反跳陽子スペクトロメータをユーリッヒの COSY に移動し、核破碎反応で生成する陽子のスペクトルを測定する計画もある。

4. 最後に

フランスでは予算不足のために加速器がシャットダウンする中、日本は加速器ラッ

シュの状態なので対照的で面白い。フランス人には個人主義が深く根付いているが、日本人よりも他人に対し親切であった印象を受けた。家内が一人で生後数ヶ月の子供を連れてパリに買い物に行く時に、ベビーカーを階段の上に運んでくれたり、重い荷物を持ってくれたり、常識と言わんばかりに色々と助けてくれた。ところが日本に戻ってくると、パリで体験したように助けてくれる人はあまりいない。この親切な点は非常に見習うべきであると思うが、加速器をシャットダウンすることだけは見習って欲しくない。

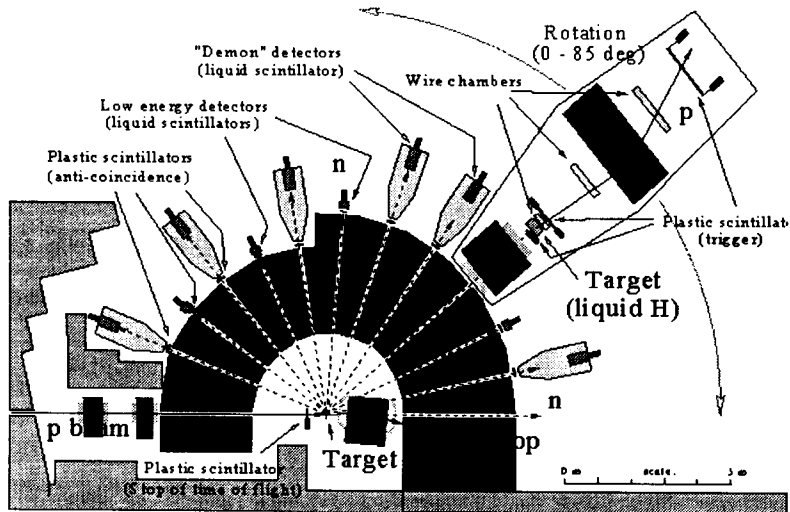


図1 (p,xn)反応の二重断面積に用いられた測定体型

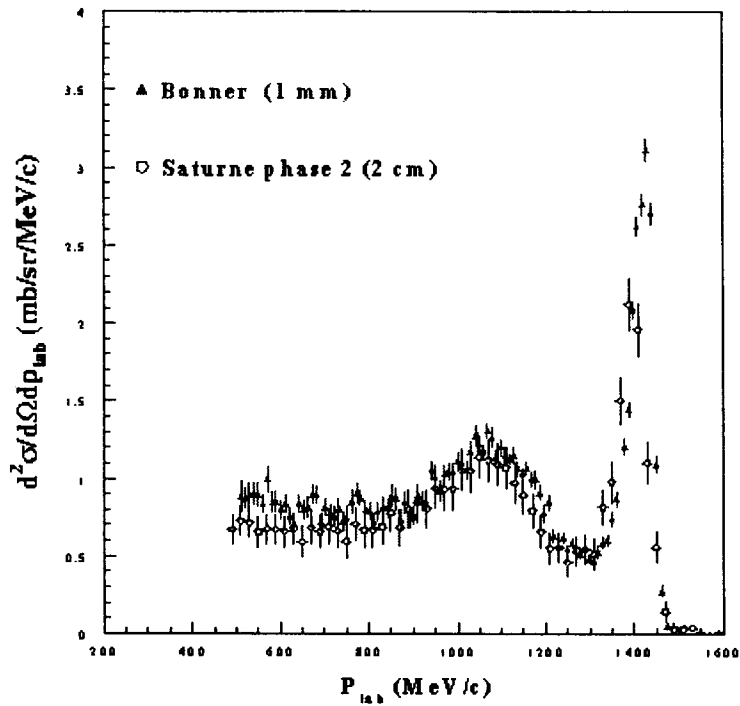


図2 磁気スペクトロメータで得られた 0° における 0.8 GeV 陽子の $\text{Pb}(p,xn)$ 反応の微分断面積(暫定値)。図の \blacktriangle と \circ はそれぞれ phase1 の phase2 の測定結果。 $1.4\text{ GeV}/c$ (運動エネルギー 0.75 GeV)と $1.1\text{ GeV}/c$ (運動エネルギー 0.5 GeV)にそれぞれ quasi-elastic と Δ 共鳴によるピークがみられる。