

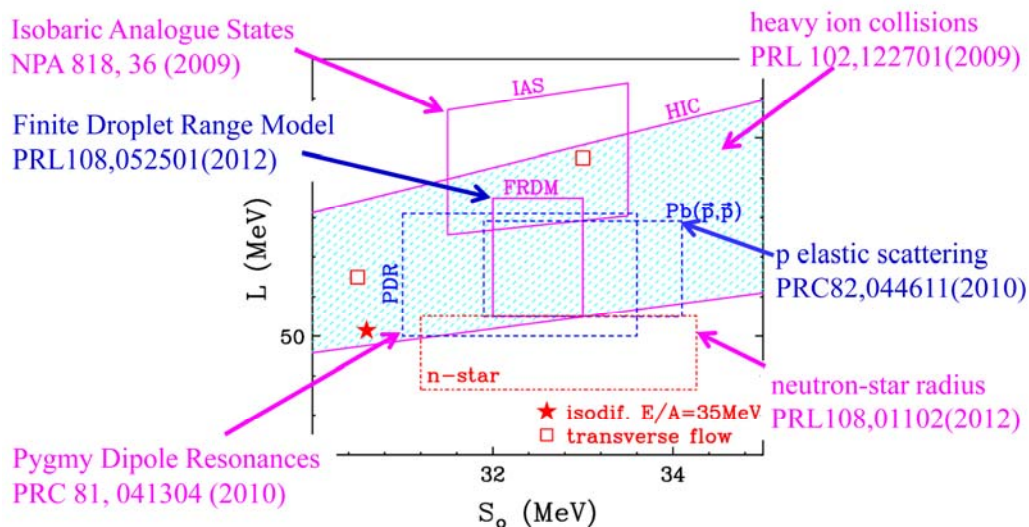
## B01 班 “高密度中性子過剰核物質の状態方程式”

我々B01 班では、中性子星の半径と質量の関係を支配していると考えられている中性子過剰核物質の状態方程式(Equation of State; EOS)、中でも現状では不定性が非常に大きい“対称エネルギー”と呼ばれる項の通常核物質の約 2 倍程度の高密度領域での振舞いを世界に先駆けて決定することを目指している。この密度領域は、中性子星に於いては **outer core** と呼ばれている領域に対応していて、この領域での“対称エネルギー”は中性子星の半径を決定する重要な役割を果たしている。実験手法としては理研不安定核ビーム工場(RIBF)で生成される幅広い陽子数/中性子数比を持つ中間エネルギー不安定核ビームを安定な標的核に衝突させ、中心衝突から発生する正負荷電パイオンの生成比を系統的に調べ、その結果を理論計算と比較することにより対称エネルギーの密度依存性に制限を付ける。収量の少ない荷電パイオンの比を正確に測定するため、まずは、RIBFの基幹装置として建設された磁極間の空隙が1 m 近くある大型のSAMURAI超電導電磁石に組み込んで使う汎用性の高い多重飛跡検出器(Time Projection Chamber; TPC)系の製作を中心に研究・開発を進めている。

## 2012 年度の活動

### プロローグ

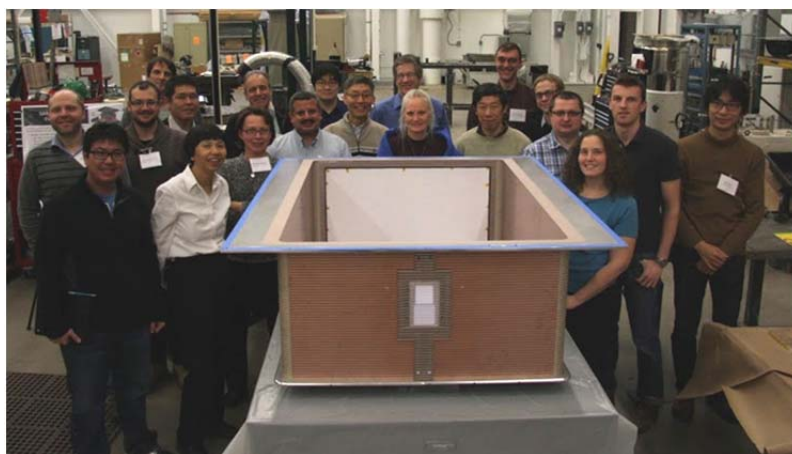
重イオン衝突実験の実験データから EOS の情報を導出するにあたって、どうしても“輸送方程式”を中核とする理論計算を使う必要があるが、常に問題になるのが計算結果の信頼性である。この点をチェックするため、まず通常核密度領域での“対称エネルギー”の情報を重イオン衝突実験から導いた場合と、精密な理論構造計算が可能な鉛 208 の中性子スキンの厚さ等を使って導いた場合とについて比較検討をしてみた。詳しいことは *Phys. Rev. C* 86, 015803 (2012)を見て頂きたいが、その結果を簡単に図示すると下のようになる。



この図の横軸  $S_0$ 、縦軸  $L$  は“対称エネルギー”を密度の関数として通常密度周りで展開した時の 0 次、1 次の係数である。図から分かるように、重イオン衝突実験から求められたこれら 2 つの係数の拘束領域は、他の方法で求めたものとよく一致している。従って、“輸送方程式”に基づく理論計算を高核密度領域に広げて使い、原子核-原子核衝突実験のデータから高核密度領域での EOS 導出することの妥当性が示されたと判断する。

### 大型 TPC の開発・製作

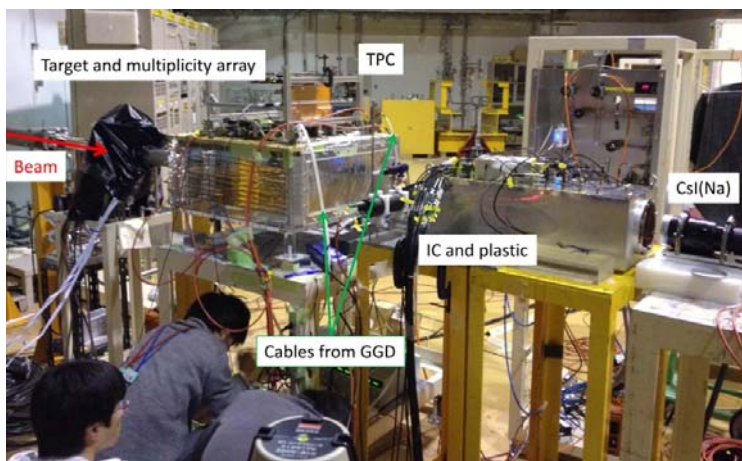
我々のプロジェクトの明暗を決める多重飛跡検出器の開発は、検出器本体についてはアメリカ DOE の予算を使って、ミシガン州立大学を中心にアメリカの共同研究者が進めている。2012 年度初めに基本設計が終わり、順次部品の製作を始めている。



右の写真は、2013 年 1 月にコラボレーション集会のためにミシガン州立大学に集まった国際共同研究者とともに撮った製作途上の TPC の写真である。

### TPC 読み出し回路の開発

TPC からの 1 万チャンネルを超える信号の処理をする回路については、フランス、サクレを中心にして国際共同で開発している GET (General Electronics for TPC) を採用すること



を決めているが、我々日本人グループでは実際の実験状況に近い環境での動作テストを行っている。2013 年 3 月初め、小型の TPC を放射線医学総合研究所 HIMAC に持ち込み、プロトタイプ GET の動作を核子当り 400 MeV の  $^{132}\text{Xe}$  ビームを直接 TPC に入射させテストした。その際のセット

アップの様子を写真で示す。TPC と読み出し回路系を安定に動作させるために、我々の収集したい事象が発生した時にだけ TPC が信号を出すようにする Gating Grid Driver (GGD) の開発、テストも平行して行い、いくつか改善すべき点を確認することが出来た。

## 2013 年度の活動

### TPC 読み出し回路の調達

量産の準備を進めていた 2012 年の秋に予期していなかったバグが見つかったことから、最終版の GET-ASIC (AGET と呼んでいる) の製造が数か月遅れることになってしまった。この遅延のためチップを搭載する基板自体のテスト、それにそれを使った製作中の大型 TPC 本体の信号テストが大幅に遅れそうになった。そのような事態を回避するため、緊急避難的にベータ版のチップを搭載した前段処理基板 AsAd の最終テスト版を 2 枚手に入れ、放医研での実験で基板の動作テストを行うとともに、量産 AGET 調達用等に取り分けてい



た 2012 年度の予算を 2013 年度に繰り越すことにした。AsAd 最終テスト基板のテスト結果が良好であったので、夏前に AsAd 基板の設計を固定し、これに搭載する最終版の AGET の量産を待つことにした。秋口によ

やくフランスで 160 個の AGET を受け取ることが出来たので(写真参照)、直ちに AsAds 製作業者に引き渡し、最低限必要な枚数の調達を開始した。そして、年度末までに AsAd を含む主だった読み出し回路の調達を完了した。

### 大型 TPC のテスト

夏の時点でワイヤー面の製作まで終了していた大型 TPC のテストを行うため、動作確認を終えたテスト用 AsAd 基板をミシガン州立大学に持ち込み、放電防止用に別途開発した ZAP と呼ばれているボードを介して TPC に装着した。そして、限定されたチャンネル数ではあるが宇宙線を使ったテストを行い、

荷電粒子の飛跡信号を見ることに成功した。このテストの際に見つかった TPC の不具合の手直しを進めるとともに、2012 年度来開発を進めてきた高速 ON/OFF スイッチ回路 GGD の動作速度を速めるために、回路の改良だけでなく TPC 本体に張った Gating Grid と高電圧供給ラインが持つインピダンスの調整作業を進めた。その後、2014 年 2 月末に TPC 本体を理化学研究所に搬入した。写真は搬入作業の様子である。

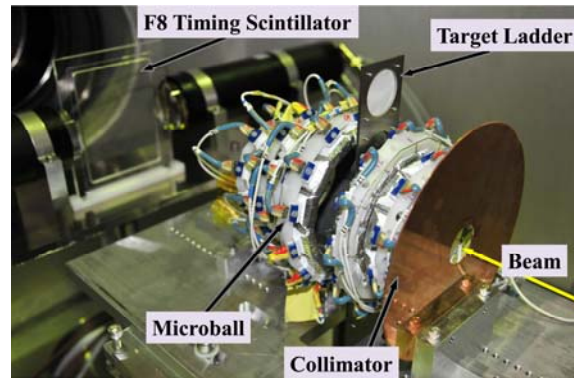


また、GGD に動作開始信号を送る TPC のトリガー検出器の概念設計を始め、**計画研究 A2 班のアドバイスを受け**、磁場の中でも安定に動作する MPPC とその読み出しに特化した回路の設計を開始した。トリガー検出器の開発は。ポーランド及び中国の研究者と共同で行いことになっている。



## アイソスピン拡散の実験

2013年度は、TPCシステムの開発に加えて、6月にかねてから企画していた低密度陽子過剰原子核物質の状態方程式を原子核衝突で探る実験を実施した。写真は標的付近の検出器の様子である。この実験はミシガン州立大学で安定な錫原子核ビームを使って長年行われてきた“アイソスピン拡散過程”の実験をより“対称エネルギー”に対する感度が高い理研 RIBF で加速される陽子過剰の錫領域の不安定核ビームを使ったものに拡張し、より確度の高い情報を得ることを目指している。この実験は物理情報を得ることを主目的にはしているが、質量数が 100 以上の高強度（毎秒  $3 \times 10^5$  個）の不安定核ビームを本格的な核反応に使う初めての実験でもあり、TPC を使った本実験を行う前に、この種の実験特有の問題点を探る役割も果たしている。十分な量のデータの収集には成功したが、同時にこれぐらいの強度で質量数が 100 近辺のビームを使った場合、ビームライン検出器が長時間は安定に使えないことが明らかになり、今後改善する必要があることが分かった。この実験の予備的なデータ解析結果は京大の大学院生が修士論文にまとめているが、本格的なデータの解析はこれから 1-2 年をかけて行い、その結果を査読論文として公表する予定である。



より信頼度の高い理論計算を目指して

実験データ解析の前準備として、より信頼度の高い理論計算が身近にできるように、**理論班 (D01 班) と共催**で7月に[RIBF ULIC-MiniWS027] Nuclear symmetry-energy and nucleus-nucleus collision simulation を理化学研究所で開催し、現状のシミュレーションプログラムの抱える問題点と、無理なく手のつけられそうな改善方法について議論を進め、今後とも新しいプログラム開発を共同で進めることで合意した。

マシンタイムの申請

2013年6月、12月に開かれた RIBF-NPPAC-12,13 に、SAMURAI-TPC を使った高密度中性子過剰核物質の EOS を探究する実験として、核子当り 300 MeV の不安定核ビーム ( $^{108,132}\text{Sn}$ ) を安定錫標的に衝突させ、 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 、 $^{124}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 、 $^{108}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$  等の中心衝突から発生する  $\pi^+$  と  $\pi^-$  との比を系統的に求める実験を提案して、総計 13.5 日のマシンタイムが採択された。この結果を受けて、2015 年度の遅くない時期に実験が実施できるよう、TPC を安定に動作させるのに必要なガス供給システム、高電圧電源の整備を始め、年度内に装置の導入を完了した。