

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18340063

研究課題名 (和文) コヒーレント $\pi$ 中間子生成による超新星爆発メカニズムの研究

研究課題名 (英文) Study of the mechanism on the super nova explosion by proton induced coherent pion production.

研究代表者

酒見 泰寛 (SAKEMI YASUHIRO)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・教授

研究者番号：90251602

研究成果の概要：

超新星爆発後に形成される高密度核物質・中性子星の内部構造、特に $\pi$ 中間子凝縮状態への相転移臨界密度に関して知見を得るために、中間エネルギー陽子ビームを用いたコヒーレント $\pi$ 中間子生成 (CPP) 実験を行った。

終状態に生成される $\pi$ 中間子のエネルギーを高精度に測定するため、高位置分解能ガス電子増幅検出器 (GEM) を新しく開発した。この新規開発した GEM 検出器と大阪大学・核物理研究センターの高分解能中性子測定器 (NPOL2) と組み合わせて、 $^{12}\text{C}$  ターゲットからの生成 $\pi$ 中間子と荷電移行反応中性子を同時計測し、残留原子核である  $^{12}\text{C}$  の励起状態を $\sim 7\text{MeV}$  程度の高エネルギー分解能で測定する技術を確立した。

平成 19 年に行った本実験から、終状態の  $^{12}\text{C}$  が基底状態にとどまる「コヒーレント」過程 (コヒーレント $\pi$ 中間子生成) を識別し、その反応断面積から原子核媒質中における  $\Delta$  粒子間相互作用の短距離成分強度を実験的に抽出することに成功した。その結果、 $\Delta$  粒子間相互作用の短距離成分が斥力に働く傾向を見出した。実験的に抽出した  $\Delta$  粒子間相互作用強度から、CPP 実験の統計精度による不確定要素が大きいものの、理論研究の進展とともに $\pi$ 中間子凝縮状態の臨界密度に関する情報を得つつある。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2007年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：原子核物理

科研費の分科・細目：物理・素粒子原子核宇宙

キーワード：核力、コヒーレント $\pi$ 中間子、デルタ粒子間相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

超新星爆発後に形成される高密度核物質である中性子星に関して、その内部構造の定量的な知見は非常に乏しい。高密度核物質中では、核力の特異な性質から特徴ある相転移現象が生じると考えられているが、その基本的性質である相転移臨界密度を実験的に抽出・評価するのは困難で、その実験研究の進展が待たれていた。

高密度核物質の性質を知る上で重要なのは、核力、特にその短距離成分の強度であるが、これまで中間エネルギー荷電移行反応によるガモフテラー遷移、および準弾性散乱実験から、核力の短距離成分を特徴づける3つのパラメータのうち、核子間相互作用と核子・ $\Delta$ 粒子間相互作用の2つのパラメータに関して高精度の情報が得られている[9]。しかしながら $\pi$ 中間子凝縮状態は3番目のパラメータである原子核媒質中の $\Delta$ 粒子間相互作用強度に大きく依存することが理論的に予測されており、その強度を実験的に抽出することが $\pi$ 中間子凝縮状態解明の鍵となる。

そこで中間エネルギー陽子ビームを用いたコヒーレント $\pi$ 中間子生成実験から原子核媒質中における $\Delta$ 粒子間相互作用の強さを抽出する研究に着手した。これは終状態で中性子と $\pi$ 中間子が生成されることを確認し、そのエネルギーから残留核が基底状態にとどまることを識別することで、原子核媒質中を核子空孔状態と $\Delta$ 粒子状態が伝搬する過程を特定し、その伝搬中に作用する $\Delta$ 粒子間相互作用の強さを反応断面積から実験的に抽出するものである。

これまで米国・ロスアラモス研究所、フランス・サクレ研究所でコヒーレント $\pi$ 中間子生成 (CPP) 実験が行われてきたが、実験装置の不具合および測定器のエネルギー分解能が十分でなく、残留核が基底状態であることを識別することが困難であったため、本研究課題ではじめてコヒーレント過程の特定と高精度反応断面積の測定技術を確立する。さらに測定結果から、 $\Delta$ 粒子間有効相互作用の強さを評価し、 $\pi$ 中間子凝縮状態の臨界密度に関して知見を得ることを目指す。

## 2. 研究の目的

超新星爆発後に形成される高密度核物質・中性子星に関して、その内部構造の理解を深める。特に原子核媒質の相転移現象である $\pi$ 中間子凝縮状態に焦点を絞り、その基本物性である相転移臨界密度を、核力を軸に実験的に抽出する方法を確立する。

高密度核物質の物性を決める大きな要因は、原子核を構成する核子間相互作用である核力の短距離成分である。本研究では、核子間距離が中距離以上は $\pi$ 中間子と $\rho$ 中間子交換に基づく1中間子交換模型により記述し、短距離成分は核子間、核子・ $\Delta$ 粒子間、 $\Delta$ 粒子間の3つの強度パラメータ (ランダウ・ミグダルパラメータ) で特徴付ける接触相互作用として取り扱う。CPP過程の理論計算の結果、その反応断面積は $\Delta$ 粒子間相互作用の強さに敏感であり、実験的に $\Delta$ 粒子間相互作用に関する情報を得るのに適した観測量であることが示唆されている。

そこで、これまで理解が進んでいない原子核媒質中における $\Delta$ 粒子間相互作用の短距離成分を CPP 実験により精度よく決め、得られた強度から $\pi$ 中間子凝縮状態の臨界密度を抽出する方法を確立する。中性子星の内部で発現していると予想されている $\pi$ 中間子凝縮状態の臨界密度を知ることで、中性子星の内部構造、そして超新星爆発後の中性子星生成に関する基本情報を得る。

## 3. 研究の方法

中間エネルギー陽子ビームによるコヒーレント $\pi$ 中間子生成測定から、 $\Delta$ 粒子間相互作用の短距離成分強度を抽出する。コヒーレント $\pi$ 中間子生成とは、 $p+^{12}\text{C}\rightarrow n+^{12}\text{C}+\pi$ と記述され、陽子ビームから放出された仮想パイ中間子が $\Delta$ 粒子・核子空孔状態を次々と作りながら伝播し、終状態で実パイ中間子になる過程であり (図1参照)、この断面積には $\Delta$ 粒子間相互作用の強さが大きく依存している。

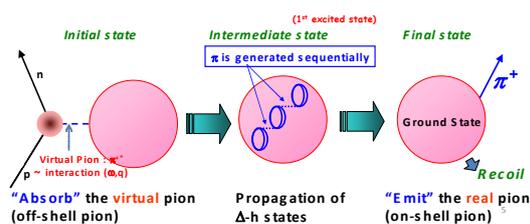


図1: コヒーレント $\pi$ 中間子生成の反応過程は、仮想 $\pi$ 中間子の弾性散乱とも考えられる。

この実験で重要なことは、終状態の残留核が基底状態にとどまること (コヒーレント過程) を識別することである。終状態で散乱・生成される中性子と $\pi$ 中間子のエネルギーから、残留核の励起状態スペクトルを再構成する。本研究課題では、標的核として基底状態と第一励起状態 (4.4 MeV) のエネルギーギャップが十分大きい $^{12}\text{C}$ を用いた。また陽子ビームのエネルギー幅も分解能に大きく影響するため、高品質ビームを供給可能な

大阪大学・核物理研究センター・リングサイクロトロンからの陽子・400MeV ビームを用いて実験を行う (図 2 参照)。

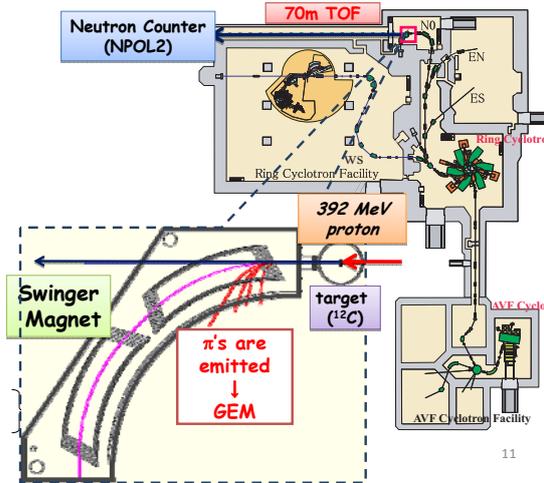


図 2 : CPP 実験の検出器配置の概観。中性子は 70mTOF 下流に設置した検出器 (NPOL2) で、 $\pi$  中間子は Swinger 中に設置した GEM 検出器で測定する。

CPP 反応断面積は、遷移振幅に入ってくるオペレータの構造から、終状態における中性子と  $\pi$  中間子が 0 度方向に散乱・生成される場合最大となる。一方、有限角度では歪曲波の効果から急激に断面積が減少することが理論的に予測されており、残留核の励起スペクトルから基底状態にとどまることを要求するとともに、断面積が前方集中であることを確認することで、コヒーレント  $\pi$  中間生成過程を精度よく同定する。

散乱中性子エネルギースペクトルにおいて、その断面積ピーク位置が関与する核力の性質や強度の情報を示すことになる。一般に、中性子エネルギースペクトルには、 $\Delta$  共鳴領域に巨大な断面積が分布することになり、コヒーレント過程はその裾野に非常に小さい寄与として分布することになる。本研究課題では、 $\Delta$  共鳴を起こすには低い入射エネルギー (400 MeV) で実験を行うことにより、CPP 過程の抽出におけるバックグラウンドを低減する。

得られた CPP 断面積の中性子エネルギースペクトルのピーク位置から、 $\Delta$  粒子間相互作用の強度を抽出する。そして、これまで研究が進められてきた核子間相互作用、核子・ $\Delta$  粒子間相互作用の短距離成分強度と統合して、平均場近似理論計算から評価される  $\pi$  中間子凝縮状態臨界密度の  $\Delta$  粒子間相互作用強度依存性から、中性子内部構造の基本物性である  $\pi$  中間子凝縮状態への相転移臨界密度を評価する。

#### 4. 研究成果

本研究課題で鍵となる  $\pi$  中間子検出器として、ガス電子増幅電極 (GEM) を用いた高分解能位置検出器を新しく開発した。 $\pi$  中間子は、一次ビームである陽子ビームをビームダンプに輸送するための偏向電磁石 (Swinger) で運動量分析し、Swinger 中に設置する新規開発位置検出器によりその軌道を再構成することで、エネルギーを測定する。検出器に要請される性能として、①反応点に近い位置に設置するため、耐放射線に強い、②Swinger 中に設置するため、高磁場中 (1 T 程度) で安定して動作する、③限られたスペースに設置するために、検出器本体および信号読み出し部分がコンパクトである、という 3 項目の実現が必要である。

そこで高エネルギー素粒子実験分野で考案され、ビームプロファイル検出器等で活用されていた GEM 検出器を、中間エネルギー原子核実験の分野に導入した。GEM 電極は、薄いポリイミドの両面に銅を貼り付けたフィルムに直径 80 ミクロンの穴を多数配置した電極であり、ガス中に配置した GEM 電極の両面に電圧を印加することで穴に形成された高い電場勾配により、高エネルギー荷電粒子が通過した際イオン化されて生成される電子をガス増幅して検出する (図 3 参照)。

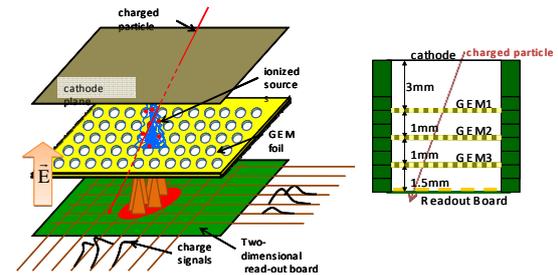


図 3 : GEM 検出器の原理。高速荷電粒子が通過する際電離された電子が、GEM 電極穴周辺の高い電場勾配により増幅され、読み出し基盤のストリップにより位置検出される (左)。今回の GEM は 3 層にして高い増幅度を実現した (右)。

上記の 3 つの必要性能を実現するために図 3 に示すようにこの GEM 電極を 3 層に配置した。各 GEM 電極に印加する電圧は低くして動作させることで放電等の放射線ダメージを軽減させ、かつ複数枚の GEM を配置することで、ガス増幅度を高め必要なゲインを得た。最終段には、半導体微細加工技術を用いて水平・垂直方向の 2 次元情報を検出するためのストリップ電極を積層構造にして製作し、1 枚の薄い (厚さ 100 ミクロン) ガラスエポキシ基盤で 2 次元位置検出器としての機能をもたせた。さらに、3 層の GEM 電極間、そして読み出し電極間の間隔を狭くすることで薄い検出器を実現し (図 4 参照)、高磁場中での増幅電子軌道の歪みを軽減して分解能の劣化を防いだ。また信号読み出し

には、各ストリップからの蓄積電荷情報を持ったバッファリングし、同期信号とともにシリアルに転送する読み出し回路を開発し、合計2000チャンネル以上ある読み出しを、読み出しを制御する信号と同期信号、そしてシリアル読み出しラインの合計数本の信号ラインで検出器から取り出す回路構成を確立した。

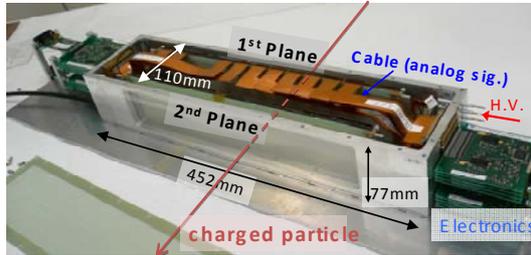


図4：GEM 検出器の概観。写真に示す検出器容器の中に、2面のGEM 検出器が配置されており、粒子の軌道を測定する。

この新しく開発したGEM 検出器と読み出し回路を用いて、ビームを用いた動作試験を行い、高磁場中で所定の位置分解能で安定して動作することを確認した。Swinger 中では、検出器設置位置の制限から $\pi$ 中間子は斜め入射が主なコンポーネントとなり、検出器自体が持つ分解能より若干悪く位置分解能1~2ミリ程度を達成した。詳細な磁極構造をとりいれた3次元電磁場計算からSwinger 内部での磁場マップを作り、 $\pi$ 中間子軌道の再構成を行った。これらの解析から $\pi$ 中間子エネルギー分解能は数MeV と評価され、CPP 実験に必要な性能を実現した[10,学会発表：3]。

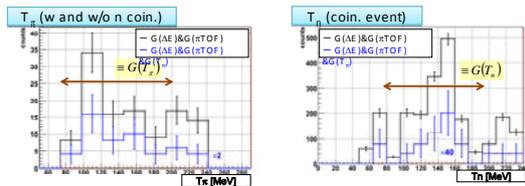
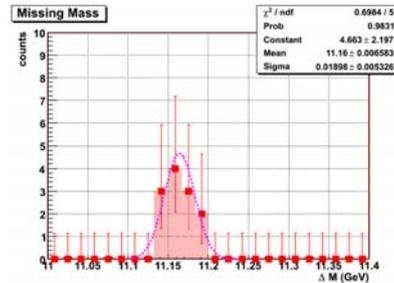


図5：左が $\pi$ 中間子、右が中性子のエネルギースペクトル。青が粒子識別等、すべてのゲートをかけたあとのスペクトルを示す。

中性子は70mの飛行時間測定トンネルに設置された液体シンチレータを含む7つの中性子検出器(NPOL2)を用いて測定した。上述の $\pi$ 中間子検出器と中性子検出器により、 $\pi$ 中間子と中性子の同時計測を行い(図5参照)、残留核の励起状態の測定精度~7MeVの分解能を達成した。残留核のスペクトルを図6に示す。この分解能は $^{12}\text{C}$ の第一励起状態(4.4MeV)を分離するには十分ではないが、従来の世界最高分解能~30MeVを大きく上回るものであり、残留核の基底状態識別効率を格段に向上させることに成功した。本実験においてコヒーレント $\pi$ 中間子

生成断面積と散乱中性子エネルギースペクトルを散乱角度0度を含む前方角度で測定を行い、コヒーレント過程の特徴である断面積の前方集中角度分布が確認され、図7に示すように検出器アクセプタンスを考慮したシミュレーションとの一致も確認され、コヒーレント過程の同定を確実なものとした[8,10,学会発表：2]。

図6：残留核のエネルギースペクトル。基底状態をピークに7MeVの分解能を達成した。第一励起状態を識別す



るには至らなかったが、世界最高分解能での測定を実現。

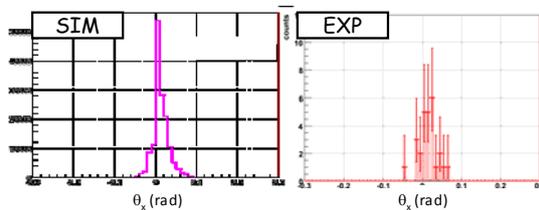


図7：CPP 過程の $\pi$ 中間子散乱角度分布。左が検出器アクセプタンスを考慮したモンテカルロシミュレーションの結果。右の実験データをよく再現する。

コヒーレント $\pi$ 中間子生成における散乱中性子エネルギースペクトルのピーク位置は、 $\Delta$ 共鳴位置より低い励起エネルギーに分布していることが明らかになった。CPPのピーク位置は、低(高)励起エネルギーにシフトしている場合、 $\Delta$ 粒子間相互作用が引力(斥力)傾向にあることを示唆しており、本研究の実験結果から、 $\Delta$ 粒子間相互作用の短距離相関パラメータを評価した。従来、核子間、核子・ $\Delta$ 粒子間、 $\Delta$ 粒子間相互作用の短距離相関パラメータをすべて等しく(3種類のランダウ・ミグダルパラメータをすべて0.6とする)置いた理論計算が行われてきたが、この理論枠組みで予測されるCPPの断面積ピーク位置より高エネルギー励起状態に実験結果は分布することを示した(図8参照)。したがって、 $\Delta$ 粒子間相互作用のパラメータは0.6より大きくなることがあきらかになってきた。現在、さらに詳細なデータ解析を進めており、理論計算の進展とともに、 $\Delta$ 粒子間相互作用の強度から $\pi$ 中間子凝縮状態の相転移臨界密度の抽出を行う予定である。以上のことにより、CPP測定から、 $\Delta$ 粒子間相互作用の強度決定を行い、 $\pi$ 中間子凝縮状態への臨界密度を評価する方法を確

立した[学会発表：1]。

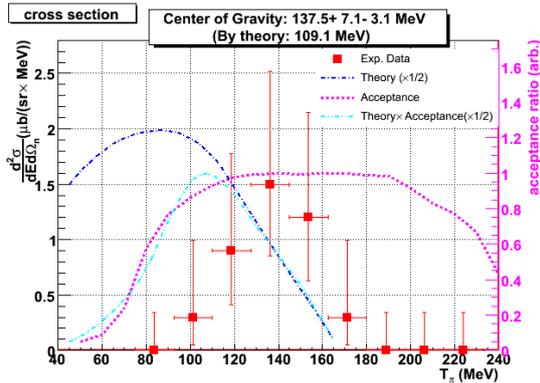


図8：コヒーレントπ中間子生成の反応断面積。赤が実験値、青点線が全てのランダウ・ミグダルパラメータを0.6とおいたときのE.Osetによる理論計算値。断面積のピーク位置が、理論値に比べて右にシフトしているが、これはΔ粒子間残留相互作用が斥力方向に働く傾向を示している。

今後の方向性として、残留核の励起エネルギーCPP過程のさらに高精度の識別を目指した(<sup>3</sup>He, t)荷電交換反応による実験が考えられる。今回分解能を制限していた要因の一つは中性子検出器である。さらに高分解能化を達成するには長い中性子飛行距離が必要となるが、検出器のアクセプタンスは著しく小さくなり現実的でない。そこで散乱粒子も荷電粒子であるとともに、原子核反応機構がシンプルと予想される軽イオン反応が有力な候補と考えられ、今後、理研・RIBF等での実験の展開が考えられる。また、本研究で得られるΔ粒子間相互作用の強度は、軽イオン反応の特徴である原子核表面での核子密度の小さい領域での値である。高密度核物質の核子密度領域での相互作用強度を評価するためには、ニュートリノビームによるCPP断面積の測定を行い、ニュートリノが原子核深部まで相互作用を行うことに注目し、原子核飽和密度でも相互作用強度を得ることで、高密度状態でのより高精度のΔ粒子相互作用を抽出することが可能になると考えられる[10]。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

[1] Complete set of polarization transfer coefficients for the He-3 (p, n) reaction at 346 MeV and 0 degrees.

T. Wakasa et al. May 2008. 6pp.

Phys.Rev.C77:054611,2008. 査読有

[2] Study of energy dependence of pion production by proton on copper target near 350-MeV.

E.V. Karpechev *et al.* 2008. 8pp. (15人中8番目)

Phys.Atom.Nucl.71:1-8,2008. 査読有

[3] Gamow-Teller transitions in exotic pf-shell nuclei relevant to supernova explosion.

Y. Fujita *et al.* 2008. 6pp. (40人中19番目)

J.Phys.G35:014041,2008. 査読有

[4] (He-3,t) reaction on the double beta decay nucleus Ca-48 and the importance of nuclear matrix elements.

E.-W. Grewe *et al.* Nov 2007. 8pp. (24人中15番目)

Phys.Rev.C76:054307,2007. 査読有

[5] Study of nuclear correlation effects via C-12(vec-p,vec-n)N-12(g.s.,1+) at 296-MeV.

T. Wakasa et al. Aug 2007. 15pp.

Phys.Lett.B656:38-44,2007. 査読有

[6] High rate production of polarized He-3 with meta-stability exchange method.

Emma Ihara, Tomotsugu Wakasa, Masanori Dozono (Kyushu U.), Yasuhiro Sakemi (CYRIC, Tohoku U.) . Aug 2007. 6pp.

J.Phys.Soc.Jap.77:025002,2008. 査読有

[7] Gamow-Teller Strength in the Exotic Odd-Odd Nuclei La-138 and Ta-180 and Its Relevance for Neutrino Nucleosynthesis.

A. Byelikov *et al.* Feb 23, 2007. 4pp. (25人中17番目)

Phys.Rev.Lett.98:082501,2007. 査読有

[8] Proton induced coherent pion production.

K. Fujita, Y. Sakemi et al. 2007. 4pp.

AIP Conf.Proc.915:803-806,2007. Also in \*Kyoto 2006, Spin physics\* 803-806 査読有

[9] Study of the pionic enhancement in O-16(p,p')O-16(0-,T=1) at 295 MeV.

A. Wakasa et al. Jan 2006. 5pp.

Phys.Lett.B632:485-489,2006. 査読有

[10] Study for the neutrino coherent pion production experiment.

Y. Sakemi . 2006. 3pp.

Nucl.Phys.Proc.Suppl.155:266-268,2006.

査読有

[学会発表] (計 3 件)

[1] 11<sup>th</sup> International workshop on 'accelerator and beam utilization', September 2007, Korea Atomic Energy Research Institute, 'Nuclear Physics at CYRIC' 招待講演

[2] 17th International Spin Physics Symposium (SPIN06), Kyoto, Japan, 2-7 Oct 2006. 'Proton induced coherent pion production'

[3] 国際会議: 7<sup>th</sup> International Conference on Charged Particle Optics, Trinity

College, Cambridge, England, July 2006.  
'Beam diagnosis system for high  
resolution beam transportation'

研究者番号 : 10311771

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

- ① 本研究課題に関連する下記の研究会主催。  
RCNP 研究会「超新星爆発とニュートリノ  
原子核反応」
  - ・日時 : 平成 19 年 3 月 2 日～3 日
  - ・場所 : 大阪大学・核物理研究センター  
(RCNP)
  - ・研究会ホームページ :  
<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~sakemi/snWS.html>
  - ・26 講演、参加者 50 名
- ② 本研究課題による学位取得者 (大阪大学)  
1 名。学位論文は下記のホームページ :  
<http://cycgw1.cyric.tohoku.ac.jp/~sakemi/cpp.pdf>
- ③ 本研究課題のホームページ :  
<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~sakemi/Cpp.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

酒見 泰寛 (SAKEMI YASUHIRO)  
東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソ  
トープセンター・教授  
研究者番号 : 90251602

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

畑中 吉治 (HATANAKA KICHIJI)  
大阪大学・核物理研究センター・教授  
研究者番号 : 50144530  
民井 淳 (TAMII ATSUSHI)  
大阪大学・核物理研究センター・准教授  
研究者番号 : 20302804  
作田 誠 (SAKUDA MAKOTO)  
岡山大学・自然科学研究科・教授  
研究者番号 : 40178596  
若狭 智嗣 (WAKASA TOMOTSUGU)  
九州大学・理学研究科・准教授