

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23684011

研究課題名(和文)シグマ陽子散乱断面積測定によるバリオン間力の斥力芯の起源の解明

研究課題名(英文)Reveal of Origin of Repulsive Core in Baryon-Baryon Interaction by Differential Cross Section Measurement of Sigma p scattering

研究代表者

三輪 浩司(Miwa, Koji)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50443982

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,400,000円、(間接経費) 6,420,000円

研究成果の概要(和文)：核力に存在する短距離での斥力芯の起源を解明するために、我々はシグマ陽子弾性散乱実験を計画している。この実験では、高強度のビームを使用し、大量のシグマ粒子を生成し、更に散乱された陽子を大きな立体角を持つ散乱陽子検出システムで検出する。この実験で中心的な役割を果たす検出器の開発を中心に行った。まずビームラインに設置したファイバー検出器によって、従来の10倍以上のビーム強度である6MHzでの実験を可能にすることが出来た。また円筒形ファイバー検出器とBGO検出器からなる散乱陽子検出器システムのプロトタイプを製作し、陽子陽子散乱実験を行い、散乱事象の同定能力等、十分な性能を確認することが出来た。

研究成果の概要(英文)：In order to reveal the origin of the short range repulsive force in the nuclear force, we are planning to perform a Sigma proton scattering experiment. In this experiment, a large amount of Sigma particle should be produced by handling a high intensity beam. Scattered protons should be detected by a Scattered Proton Detector which has a large acceptance for scattered proton. In this research, the essential detectors for this experiment was developed. At first we installed a beam line fiber detector in the K1.8 beamline, which enabled use to use a 6 MHz beam, that is, 10 times larger intensity than that of previous experiment. We also developed a prototype of a scattered proton detector which consisted of a cylindrical fiber tracker and BGO calorimeter. We performed a pp scattering experiment to evaluate the performance of the detector system by checking the identification performance of scattering events and so on. We confirmed that this detector system had an enough performance.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子, 原子核, 宇宙線, 宇宙物理

キーワード：ストレンジネス核物理

1. 研究開始当初の背景

我々の世界を構成している物質のコアをなしている原子核は、核力の遠距離での引力と近距離での斥力と言う絶妙なバランスによって安定に存在している。短距離の強い相互作用が働くにもかかわらず、原子核を構成する核子があたかも独立に運動しているという描像が成り立つのは、この近距離での斥力芯の存在が存在するためである。この核力の理解は、1fm よりも遠方では π 中間子などの交換による中間子交換模型によって良く理解されているが、一方で0.5fm よりも短距離の斥力芯に関しては中間子模型ではやや現象論的に取り扱われているというのが現状である。このような2核子が重なりはじめるような領域においては、クォークとグルーオンの自由度を取り入れて相互作用を理解するというのが自然である。このようなクォークとグルーオンの自由度を取り入れ、中間領域からは中間子描像を取り入れるというクォーククラスター模型では、この斥力芯の起源として、クォークレベルでのパウリの排他律による斥力と、クォーク間のスピン間の相互作用であるカラーマグネティック相互作用による斥力によると言われている。このクォークによる相互作用をより深く理解するには、u, d の2つのクォークに、更にsクォークを入れた、ハイペロン核子(YN)やハイペロンハイペロン(YN)相互作用を研究することが重要になる。それは、NN相互作用ではアイソスピン3重項と1重項の2種類の相互作用しか現れないのに対し、sクォークを入れてSU(3)フレーバー対称性に拡張することによって、新たに4つの相互作用が現れ、その新しく現れた相互作用ではクォーク間の相互作用が著しく現れ、核力に比べ非常に強い斥力芯や、逆に引力芯になることが言われている。これらを実験的に調べることで、斥力芯の起源と考えられるクォーク間の相互作用を明らかにすることが出来るとともに、SU(3)フレーバー対称性に拡張されたバリオン間相互作用として包括的に理解することが出来る。特に我々が注目したチャンネルは ΣN 相互作用である。 ΣN 相互作用は、 Σ がハイパー核として束縛されることが1つの例を除いて観測されていないため、 ΣN 相互作用は未だに定量的に明らかになっていない。そして ΣN (アイソスピン $I=3/2$)のチャンネルに対応する $\Sigma^+ p$ 間では系に含まれる4つのuクォークのうち2つがスピン、カラーが同一になる確率が非常に高く、斥力芯の起源とされるクォーク間のパウリ斥力によって、大きな斥力芯が存在することがクォーククラスター模型によって言われている。最近では第一原理計算である格子QCDでも定性的にこの大きな斥力芯が存在することが報告された。これを実験的に検証し、未だ明らかになっていない ΣN 相互作用を解明することが非常に重要なテーマとなっていた。

2. 研究の目的

本研究では ΣN 相互作用を散乱実験によって明らかにすることを目的とする。そしてそのための検出器開発が実質的な目的となった。

ΛN 相互作用に関しては Λ が原子核に束縛され Λ ハイパー核を形成するために、そのハイパー核のレベル構造をスペクトロスコピー二余って精密に調べることによって明らかにされて来た。一方で Σ 粒子に関しては ${}^4\text{He}$ 以外にハイパー核として存在したいため、 ΣN 相互作用をハイパー核の構造から調べることは限界がある。そのため ΣN 相互作用を調べるには Σp 散乱実験を行うことが最も適していると考えられる。 ΛN 相互作用では Λ のアイソスピンが0であるため合成アイソスピンが1/2の相互作用しか存在しないが、 ΣN 相互作用では、 Σ のアイソスピンが1であるため合成アイソスピンが3/2と1/2のチャンネルがあると同時に、 $\Sigma N \rightarrow \Lambda N$ のコンバージョンのチャンネルも存在する。これらを分けて測定出来ることが散乱実験の大きな特徴の一つであり、我々は

- (1) $\Sigma^+ p$ 弾性散乱
- (2) Σp 弾性散乱
- (3) $\Sigma p \rightarrow \Lambda n$ 非弾性散乱

の3つのチャンネルを測定することを目標とした。また Σp のチャンネルではクォーク模型ではクォークレベルでのパウリの排他律によって大きな斥力芯が言われている。この大きな斥力芯は、微分断面積を大きくする結果となる。クォークの自由度を取り入れたクォーククラスター模型(FSS, fss2)では斥力芯が強くなるほど微分断面積が大きくなると言われる。そのため、 Σp の微分断面積を測定することによって、この斥力の強さを調べる事が出来ることになる。そのためこれらの理論計算を分けることができる精度で微分断面積を導出し斥力芯の大きさを明らかにすることを目的とする。

また Σp , Σp , $\Sigma p \rightarrow \Lambda n$ の各チャンネルを測定することによって、チャンネルを分けて相互作用を調べることを大きな目標とする。

このような Σp 散乱実験は、 Σ の寿命が非常に短いために非常に困難であった。今までは液体水素のバブルチェンバーやシンチレーションファイバーからなるアクティブ標的を用いて散乱事象をイメージングする方法を用いていたが、ビーム強度が上げられない等の問題があり、十分な統計のデータを出すことが出来なかった。この困難を克服し、散乱実験を成功させるために、私たちは新たに液体水素標的を Σ 粒子の生成と散乱の標的として使い、散乱された陽子や Σ 粒子の崩壊生成物を周囲の検出器で捕らえ運動学のみで散乱事象を再構成するという実験手法を提案した。この実験手法で鍵となるのは

- (1) 大量の Σ を生成するために、大強度(10^7Hz)の π ビームを使用出来るような位置検出器としてビームラインファイバー

検出器の開発

- (2) 液体水素標的を大立体角で覆うことが出来、事象の同一性を保証するために時間分解能の良いファイバーを用いた円筒形のファイバー検出器および BGO カロリメーターからなる散乱陽子検出器の開発である。本研究では、 Σp 散乱実験を可能にするためにこれらの検出器開発に大きな重点を置いて研究をすすめた。

3. 研究の方法

我々は J-PARC K1.8 ビームラインにおいて Σp 散乱実験を行うことを計画している。図 1 に Σ 粒子の生成と運動量をタグするためのスペクトロメーターシステムおよび、液体水素標的を取り囲み、散乱陽子および Σ からの崩壊粒子を検出する散乱陽子検出システムを示す。

Σ ビームは $\pi^+ p \rightarrow K^+ \Sigma^+$ 反応で生成し、ビームの π と散乱粒子 K^+ の運動量をそれぞれのスペクトロメーターで測定することによって、 Σ ビームの運動量をタグすることが出来る。 Σ 粒子が散乱を起こしたときの、散乱陽子および Σ からの崩壊粒子を標的周囲に設置する円筒形ファイバー検出器 (CFT) およびその周囲に配置する BGO カロリメーターによって検出する。 Σ ビームの運動量はタグされているので、散乱された陽子の方向とエネルギーから、 Σp 散乱の散乱角度と陽子のエネルギーの関係を調べて、 Σp 散乱事象の運動学と同じであることを要求することによって Σp 散乱事象を同定する。

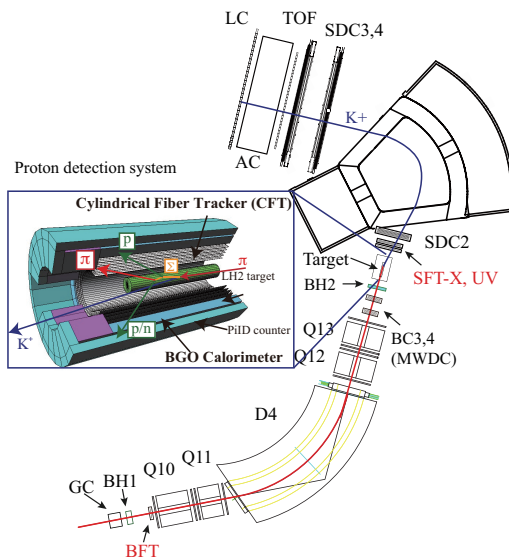


図 1: J-PARC での Σp 散乱実験のセットアップ。ビームラインおよび後方スペクトロメーターで π ビームおよび K^+ の運動量を測定することによって Σ ビームの運動量をタグする。液体水素標的の周辺に円筒形ファイバー検出器および BGO からなる散乱陽子検出器を設置し、散乱された陽子および Σ からの崩壊粒子を測定する。

4. 研究成果

申請者が実験責任者として J-PARC に実験申請を行い、この Σp 散乱実験は E40 として stage1 の承認を得ている。散乱実験に特化した検出器のアップグレードを現在行っておりそれをもとに stage2 の承認を得るための研究を進めている。それが 2. 研究の目的で述べた高強度ビーム用のファイバー検出器および標的周囲の散乱陽子検出器の開発である。

(1) ビームラインファイバー検出器の開発

我々は 10^7 Hz の大強度の π ビームを使用するためにシンチレーションファイバーからなるビームラインファイバートラッカー (BFT) を開発した。この開発の必要性は現在の J-PARC の加速器の遅い取り出しの問題点と密接に関係している。本来であれば 2 秒間の取り出し時間の間に一定の強度でビームが来なければならないのであるが、現在はビームの強度に時間的な濃淡があり、ビームが局所的に平均レートの 10 倍以上のビームが来るといった問題がある。K1.8 ビームラインでは従来は MWPC によって飛跡の検出を行っていたが、現在のビーム構造ではワイヤーが破損する等、安定に動作せず、更に時間分解能が悪いため多数の偶然の同時イベントが分離出来ないという問題があった。これらを解決するために、高強度ビーム下でも安定に動作し、且つ時間分解能が良いシンチレーションファイバーを用いた位置検出器の開発を行った。

図 2 に開発した BFT の写真と図面を示す。1mm ϕ のシンチレーションファイバーを重ねて配置している。

このファイバー検出器の特に新しい点は光検出器 MPPC を読み出しに用いて、1 本ずつのファイバーを MPPC によって読み出した点である。MPPC は半導体の光センサーであり、多数のアバランシェフォトダイオードをガイガモードで動作させる物である。この



図 2: ビームラインファイバー検出器 (BFT) の写真。ファイバーの読み出し方向から見たものであり、この端面に MPPC 基板を接続することによってファイバーからの光を検出する。

MPPC の利点は、

- ① 70V 程度の低電圧で動作させる
- ② 磁場中でも動作する

③ 比較的安価で購入出来、多チャンネルのファイバーの読み出しに適しているなどが挙げられる。一方で、動作電圧が検出器それぞれに異なっていて、0.1V程度の精度で設定しないとイケないなど、多チャンネルのMPPCを読み出すには幾つか解決すべき点がある。

このMPPCの多チャンネル読み出しを可能とするために、我々はEASIROCというASICを回路のコアに用いたEASIROCボード(v1)を開発した。この回路によって、32チャンネルのMPPCの動作が可能となり、動作電圧の20mV精度での調節、2種類のゲインの異なるADCにより低光量、高光量それぞれの場合での光量の測定が可能、multihit TDCの実装およびSiTCPを用いたネットワークによるデータ転送を可能にした。

このMPPCおよびEASIROCボードによる読み出しによって、BFTの320チャンネルのファイバーの読み出しを可能にした。検出効率としては99%以上の検出効率を得ており、位置分解能としては $190\mu\text{m}$ という十分な値を得ることが出来た。時間分解能としては $\sigma=0.78\text{ ns}$ の結果を得ることが出来た。BFTでは時間分解能が向上しているため、アクシデンタルなバックグラウンドと本物のS/N比が時間スペクトル上で非常に改善することが出来た。

この検出器をK1.8ビームラインにインストールして、従来の10倍以上のビーム強度である $6\times 10^6\text{ Hz}$ でのビームの使用を可能にした。今やこの検出器はK1.8ビームラインに欠かせない検出器となっており、同じく大強度の π ビームを用いて ${}^6\text{Li}(\pi, K^+)$ 反応を用いた中性子過剰 Λ ハイパー核のスペクトロスコピーでは、その検出感度を上げるために中心的な役割を担った。(発表論文1)

(2) 散乱陽子システムの開発

次に散乱陽子システムの開発について述べる。 Σp 散乱事象を高効率で検出するためには、液体水素標的を大立体角で覆う必要がある。散乱された陽子は比較的前方へ飛び出すため、あまり検出器システムの半径が大きくなると、前方の長さも長くなり、 K^+ を検出するスペクトロメーターのアクセプタンスの低下につながる。そのため出来る限りコンパクトに水素標的を取り囲む必要がある。また高強度下で実験を行うためアクシデンタルなコインシデンスによるイベントを排除するため、高時間分解能の検出器が必要となる。そのため我々は円筒形のファイバー検出器およびBGOカロリメーターからなる散乱陽子検出器システムの開発を行っている。

*円筒形ファイバー検出器(CFT)の開発

ファイバーをビーム方向にまっすぐ張る層(ϕ 層)およびファイバーを円柱上に螺旋をまく層(U層)を重ねることによって3次元でのトラッキングを可能にするCFT検出器の開発を行っている。まずそのような検出器の作製のfeasibilityを確認するために $\phi 1$, U, $\phi 2$ 層の3層構造からなるプロトタイプ検出器の

開発を行った。これらの検出器ではフレームの穴の場所や位置決め用に設置した柱に取り付けられた位置決めピンによってファイバーの位置を保証するという新しい手法を用いて製作を行った。図3にCFTのプロトタイプの写真を示す。このファイバーの読み出しについてもMPPCおよびEASIROCボードを用いて、約1200チャンネルのファイバーの読み出しを可能にした。

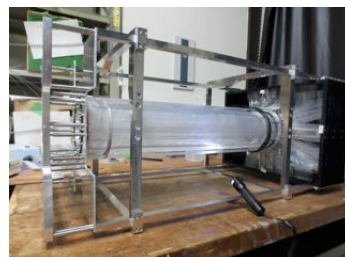


図3：製作したCFTプロトタイプ検出器。

宇宙線を用いたテストでは、平均的な光子数として約20が得られ、光量としては十分な値が得られた。しかし、ファイバー間に隙間が出来てしまったために、特に ϕ 層において検出効率が約88%程度にとどまってしまった。これは実機に向けての改善点となる。

*BGOカロリメーター

本研究では散乱陽子に対して大きなアクセプタンスを持つ必要があるため、 $32\times 25\times 400\text{ mm}^3$ と大型のBGO結晶を用いた。まずプロトタイプとしてBGO結晶1本を作製し、性能の評価を行った。このBGOに80MeVの陽子ビームを照射しエネルギー分解能を調べたところ80MeVに対して1.2%という十分なエネルギー分解能を得ることが出来た。

*プロトタイプ検出器を用いた陽子陽子、陽子炭素核散乱実験

CFTとBGOのプロトタイプを用いて Σp 散乱を行うのに十分な性能があるかをppおよびpC散乱実験を行うことによって確かめた。東北大学のサイクロトロン加速器にて、80MeVの陽子ビームをポリエチレン(CH_2)標的に照射し、散乱された陽子をプロトタイプ検出器を用いて検出した。

陽子陽子散乱および陽子炭素核散乱事象は散乱された陽子の角度とエネルギーの関係を調べることによって図4に示すようにクリアに同定することが出来た。陽子陽子散乱事象の同定の精度としては $\sigma=1.8\text{ MeV}$ と求まった。精度の理想的な分解能としては $\sigma=1.4\text{ MeV}$ に比べると、若干悪化しているのはファイバー設置の精度によるものと考えられる。しかし、1.8 MeVの精度で同定出来れば、ほぼ問題ない精度といえ、今後実機の製作では更に精度を上げることを目標とする。

また、本実験では陽子の他に π 粒子が検出器システムで検出される。この陽子と π の分離にはファイバーの ΔE およびBGOでのtotal Eの $\Delta E-E$ の関係を用いて行う。本実験で陽子

に対して得られた ΔE -Eのプロットと π での振る舞いを見積もるために宇宙線に対してデータ収集した際のプロットを重ねて図5に示す。陽子と宇宙線が十分に識別出来ることを示しており、実際の実験では陽子と π がこの程度で識別出来ると期待出来る。

これらの結果より、この円筒形ファイバー検出器およびBGOカロリメーターのシステムで十分に散乱事象が同定可能であることを確認することが出来た。現在、CFTとしては8層構造、それを取り囲むように24本のBGOを並べる散乱陽子検出器システムの実機のデザインを終え、一部製作に取りかかった。今後の研究で検出器システムを完成させ、実際にJ-PARCにて実験を行い、 Σp 散乱の微分断面積を導出するために更に研究を進める

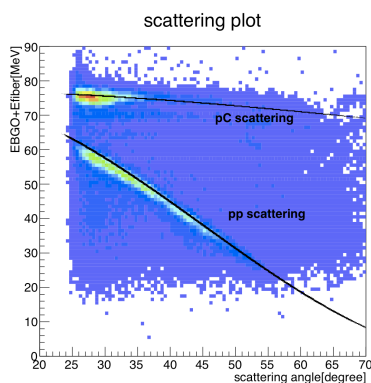


図4: 散乱角度と陽子のエネルギーの関係。 pp 散乱および pC 散乱に対応するバンドが確認出来る。黒線はそれぞれの運動学から決まるエネルギーと角度の関係である。

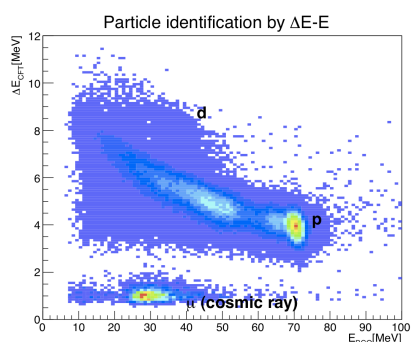


図5: CFTでのエネルギー損失(ΔE)とBGOでの全エネルギー損失(E)の関係。陽子および宇宙線にたいして粒子識別出来ているのが分かる。

予定である。

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 4 件)

- 1) Search for ${}^6\text{H}$ hypernucleus by the ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$ reaction at $p_{\perp}=1.2$ GeV/c
H. Sugimura, R. Honda, A. Sakaguchi, K.

Miwa, M. Agnello, J. K. Ahn, S. Ajimura, Y. Akazawa, N. Amano, K. Aoki, H.C. Bang, N. Chiga, M. Endo, P. Evtoukhovitch, A. Feliciello, H. Fujioka, T. Fukuda, S. Hasegawa, S. Hayakawa, K. Hosomi et al. Physics Letters B, 729, 2014, 39-44, 査読あり,

DOI: 10.1016/j.physletb.2013.12.062

2) Experimental plan of Sp scattering experiment at J-PARC

K. Miwa, R. Honda, Y. Matsumoto, H. Kanda, H. Tamura, M. Ieiri and J-PARC P40 collaboration

EPJ Web of Conference, 20, 2012, 05001. 査読あり

DOI: 10.1051/epjconf/20122005001

3) Development of a tracking detector system with multichannel scintillation fibers and PPD

R. Honda, S. Callier, S. Hasegawa, M. Ieiri, Y. Matsumoto, K. Miwa, I. Nakamura, L. Raux, C. De La Tallie, M. Tanaka, T. Uchida, K. Yoshimura

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 695, 2012, 206-209, 査読あり

DOI:10.1016/j.nima.2011.10.005

4) The development of the multi PPD readout electronics with EASIROC and SiTCP

R. Honda, K. Miwa, I. Nakamura, M. Tanaka, K. Yoshimura, T. Uchida, M. Ikeno

Proceeding of Science, PoS(PhotoDet2012), 2012, 31, 査読あり

http://pos.sissa.it/archive/conferences/158/031/PhotoDet%202012_031.pdf

[学会発表] (計 17 件)

1) 赤澤 雄也

“シグマ陽子散乱実験(J-PARC E40)のための散乱陽子検出システムの性能評価(2)”

日本物理学会、東海大、2014年3月30日

2) 塩崎 健弘

“Sp散乱実験(J-PARC E40)のためのMPPC多チャンネル読み出しボードの開発”

日本物理学会、東海大、2014年3月27日

3) Koji Miwa

“Experimental study of SigmaN interaction by scattering experiment”

Forth International Conference on Nuclear Fragmentation (NUFRA2013), ケメル(トルコ), 2013年10月1日、(招待講演)

4) 三輪 浩司

“シグマ陽子散乱実験のための円筒形ファ

イバートラッカーの製作”
日本物理学会、高知大、2013年9月20日

5) 赤澤 雄也
“シグマ陽子散乱実験(J-PARC E40)のための
散乱陽子検出システムの性能評価”
日本物理学会、高知大、2013年9月20日

6) Koji Miwa
“New experimental plan of Sigma p
scattering experiment at J-PARC”
The 8th JSPS Core-to-Core Symposium on
Strangeness Nuclear Physics, 2012年10月
5日、バルセロナ(スペイン)

7) Yuki Matsumoto
“Status of Sigma p scattering experiment
(E40) and Development of beamline fiber
tracker”
Korea-Japan workshop on nuclear and hadron
physics at J-PARC, 2012年9月22日、ソウ
ル大学

8) 三輪 浩司
“TDC 情報を用いた K 中間子選択用の 2nd
level trigger の開発”
日本物理学会、京都産業大学、2012年9月
11日

9) 赤澤 雄也
“MPPC-arrayを用いたBGOカロリメーターの
性能評価”
日本物理学会、京都産業大学、2012年9月
11日

10) 三輪 浩司
“Experimental proposal of Sigma p
scattering at J-PARC”
新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」
クロスオーバー研究会、名古屋大学、2012年
7月12日

11) Isamu Nakamura
“The development of multi PPD readout
electronics with EASIROC and SiTCP”
International Workshop on New Photon
Detector PD12, 2012年6月14日、Orsay
(France)

12) 三輪 浩司
“ハドロンビームを用いたペンタクオーク探索
-KEKとJ-PARCにて-”
日本物理学会、関西学院大学、2012年3月
25日(招待講演)

13) 本多 良太郎
“多チャンネル MPPC 読み出し用 ASIC、
EASIROC を用いた試験ボードの開発とその性
能評価”
日本物理学会、関西学院大学、2012年3月

24日

14) 松本 祐樹
“大強度ビームトラッキング用ファイバー
位置検出器の性能評価”
日本物理学会、関西学院大学、2012年3月
24日

15) Koji Miwa
“Sigma proton scattering experiment
E40”
Korea-Japan workshop on nuclear and
hadron physics at J-PARC, Seoul (Korea),
2011年9月22日

16) Yuki Matsumoto
“Development of Fiber-MPPC detector for
Sigma proton scattering experiment”
Korea-Japan workshop on nuclear and
hadron physics at J-PARC, Seoul (Korea),
2011年9月22日

17) Ryotaro Honda
“Development of a tracking detector
system with multichannel scintillation
fibers and PPD”
6th International Conference on New
Developments in Photodetection, Lyon
(France), 2011年6月5日

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者
三輪 浩司 (MIWA KOJI)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：50443982