

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03886

研究課題名（和文）次世代電子・ハドロンコライダーによる中性子の謎解明のための検出器開発

研究課題名（英文）Detector development for uncovering mysteries in neutron spectra through next-generation electron-hadron collisions

研究代表者

山崎 祐司（Yamazaki, Yuji）

神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号：00311126

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：この研究は、高エネルギー電子・陽子散乱で生成する超前方中性子の運動量分布が過去に測定により異なることを動機とした、次世代の加速器実験（米国EICおよび欧州LHeC）で中性子の精密測定を行うための基礎技術の開発である。LHeC実験では、加速器設計者と協議し超前方ゼロ度カロリメーター(ZDC)の設置場所を確定し基礎設計を行った。発展して検出器全体の概念設計、前方散乱に関連した2光子散乱の物理感度の研究を行った。EICでは実験中の中性子放射線量が10の14乗個と大きいことをシミュレーションで求め、それをもとにZDCの基礎設計を行い、放射線耐性の問題となるシリコン光電子増倍検出器の耐性を試験した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高エネルギー粒子散乱による中性子の生成量は、それ自体の生成メカニズムの解明といった素粒子・原子核分野の興味のみならず、宇宙から到来する超高エネルギー宇宙線が大気と散乱するときの空気シャワーの理解にも必要である。空気シャワーの粒子数、エネルギー分布が過去の加速器実験をもとにしたシミュレーションと合っておらず、宇宙線の組成の異常か、中性子生成の不定性が決着がついていない。このように中性子生成量は宇宙の成り立ちの解明とも関連する。また、高放射線耐性検出器は、放射線量の高い分野、たとえば放射光による物質測定、加速器の医学応用、原子炉近くでの測定などへの応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research was aiming for developing basic technologies to measure forward neutrons from high-energy electron-proton scattering in two future accelerators, EIC in US and LHeC in Europe. The study is motivated by disagreements among the neutron spectrum measurements in the past. The achievement for the LHeC is a) the confirmation of the location for the ZDC, the zero-degree calorimeter in the very forward direction of the scattering with accelerator designers; b) the conceptual design of the entire LHeC detector and c) sensitivity study to physics of the the two-photon scattering at the LHeC, which is tightly related to the forward scattering. As for the EIC, the expected dose from mid-speed neutron in the ZDC was estimated by simulation and was found that it reaches to  $10^{14}$ . The detailed design was made to make the ZDC detector at EIC to stand for that. The key component there is compact photo sensors for ZDC. The radiation tolerance of the silicon photomultiplier was studied.

研究分野：素粒子実験

キーワード：電子・陽子散乱 電子・原子核散乱 光検出器 中性子生成 カロリメーター 放射線耐性

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、ハドロンが関与する散乱における超前方中性子の生成量が実験によって異なることを背景に、次世代の電子・陽子衝突型加速器を用いて前方中性子の量の精密測定を行うための測定器開発である。電子・陽子散乱を含むハドロン散乱では、前方中性子はビーム粒子のバリオンが散乱により中性子となり放出される。そのメカニズムは一般的にはハドロンからパートンが蹴りだされ、そのパートンと残りの粒子との間に働くカラー相互作用により多数のハドロンが破砕化する帰結であると考えられる(図 1(a))。しかし特に前方では、このカラーの力が交換する運動量が小さく、裸のパートンではなく中間子が交換される(1パイオン交換, OPE)と考えられるほうがデータをよく再現する(図 1(b))。OPE モデルは電子・陽子散乱 HERA, あるいは陽子・陽子散乱 RHIC pp での中性子生成量とスペクトラムをよく再現している。一方で非常に高エネルギーの LHC 実験の測定 (LHCf 実験) では少し異なるスペクトラムが得られ、重心系エネルギーの違いによるものであるかどうか、議論となっていた。

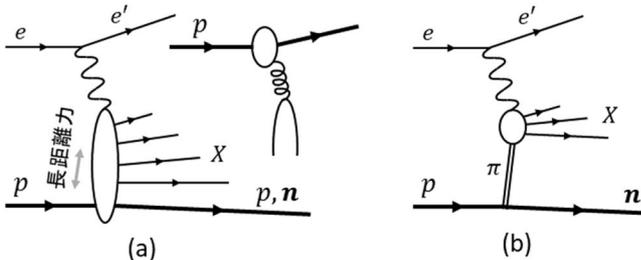


図 1 (a) ep/pp 衝突での前方粒子生成 (b) OPE モデル

これらの相違をより詳しく調べる方法とし、電子・陽子散乱を用いることにメリットがある。

電子・陽子衝突型加速器は、近年各種加速器で実現している有限角散乱を用いることにより、衝突点付近の加速器の構成要素を減らし、ビーム周辺の開口を大きくできる。上記のような超前方中性子がビームパイプの中を通過し、その先にビームを曲げたあとの衝突正面(ゼロ度)にカロリメーター(Zero-Degree Calorimeter, ZDC)を置いておけば、その大開口は広い角度範囲でとらえられることを意味する。さらに加速器のレイアウトに余裕があれば、中性子からのハドロンシャワーの漏れが少ない大きな ZDC を置き、高分解能でエネルギー測定ができる。開始当初は EIC は米国 Brookhaven National Lab, 米国 Jefferson Lab のどちらで加速器を建設するか決まっていなかったが、どちらの設計でも ZDC を置くスペースはあると考えられていた。一方 LHC に 50GeV の電子を衝突させる LHeC 計画では、ZDC のスペースは限られており、実験が難しいと考えられていた。

どちらの実験でも、散乱事象から ZDC に入るハドロン粒子のエネルギーの総和がビームエネルギーのオーダーであるため、ZDC の放射線損傷が問題となる。

## 2. 研究の目的

上記の背景をもとに、研究の目的を当初は次のように定めた。

- ハドロンカロリメーターとして分解能のよい、プラスチックシンチレーターと重金属のサンドイッチ型をベースラインとして、そこに電磁シャワー成分のみを測定するクォーツファイバーを組み合わせて分解能をあげる。そのプラスチック部の放射線耐性を調べる。
- ビーム衝突、ビームと加速器残留ガスとの散乱などからの放射線量シミュレーションを行い、ZDC が満たす放射線量を見積もる。
- ZDC の設置場所を具体化する。EIC では加速器の設置サイトが決まり、設計が具体化したところで設置スペースを確保する。LHeC は加速器の設計がまだ固まっていなかったため、固まり次第設置スペースを検討する。

## 3. 研究の方法

上記の目的をもとに、以下のように研究を行うこととした。大型プロジェクトの計画の推移とともに、ZDC 具体的な目標や ZDC およびそれに関連した検出器の動向などが変わるため、以下の研究の方法はそれを反映した。

- A. LHeC の加速器デザインが本研究初年度 (2019 年) 付近で大幅に変わり、電子ビームを円形から線形加速器で加速する方法に変え、それが具体化した。それを受けて ZDC の設置場所、ビーム開口を CERN 研究所加速器部と打合せ、ZDC から期待できる物理成果をまとめる。
- B. 同時に LHeC の検出器全体(中央飛跡検出器, 中央カロリメーター等)の策定チームに加わり、提案を集約して論文にまとめる。Liverpool 大, ドイツ DESY 研究所, イタリア INFN ボローニャ研究所と共同で行う。
- C. さらに、LHeC で前方粒子を生成する 2 光子散乱(弾性散乱の場合  $e \rightarrow e + \gamma, p \rightarrow p + \gamma, \gamma\gamma \rightarrow X$ ) の断面積計算と物理事象探索感度を調べる。非弾性散乱の場合には中性子が前

方に出て、その生成量も興味ある物理事象である。

- D. EIC の ZDC の放射線量を具体的に見積もる。研究開始後すぐに EIC が BNL に建設されると決まったのち、すでにある重イオン加速器を生かして陽子ビームエネルギーを予定の 100-140GeV より高い 275GeV に上げることが決まり、放射線量の増大が懸念されていた。
- E. 求めた放射線量をもとに、EIC の ZDC の概念設計を行い、シミュレーションで予定されていた性能が出るかを検証する。理化学研究所（当時）の清水氏、カンザス大の Michael Murray 氏などと共同で行う。
- F. 放射線量に対応した EIC ZDC の概念設計を行うが、それでも耐性が十分でない部分を同定し、耐性試験を行う。

#### 4. 研究成果

##### A. LHeC での ZDC 設置場所

加速器のデザインが前述のように更新され、電子ビームは ERL (エネルギー回収線形加速器) のレーストラック型加速器を 3 周したのち 50GeV に達し、LHC 陽子ビームと一度だけ衝突したのち運動エネルギーを高周波空洞で回収し、それが次のビームを加速するスキームに変更された。このことおよび弱い 2 重極磁場で電子を曲げる手法により、正面衝突を維持しながら衝突前の電子ビームを有限の角度で入射することができ、結果として陽子ビーム周辺に加速器機器の少ない領域ができた。ここに ZDC を置くことで合意し(図 2) [1] に掲載し、[2] で発表した。

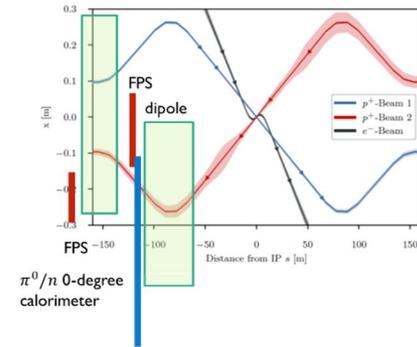


図 2 ZDC および前方陽子スペクトロメーター(FPS) の位置

##### B. LHeC 検出器全体のデザイン策定

前述の加速器デザイン変更に伴い、2 重極磁場によって衝突点でシンクロトロン放射が起きる。これを逃がすため、ビームパイプの形状を変更し、中央飛跡検出器のレイアウトを変更した。これについて英国 Liverpool 大、ドイツ DESY 研究所、イタリア INFN ボローニャ研究所らと詳細を [1] にまとめ、発表した [3]。また、LHeC 実験は LHC 実験の第 2 衝突点を用いるが、現在そこで実験を行っている重イオン衝突実験 ALICE が実験の継続を望んでおり、現在両実験を同じ衝突点・検出器で行う計画を検討している。その際の検出器の変更点について上記の研究者らと検討し、[4] で提案・議論した。両実験を行うこと、特に pp/ep 衝突を同じ検出器で行うことにより、検出器を高精度でキャリブレーションでき、W の質量など精密測定 of the 精度を上げられるメリットがある。

##### C. LHeC での 2 光子過程

$\gamma\gamma \rightarrow X$  反応により 2 光子が電弱相互作用を起こす過程、たとえば  $\gamma\gamma \rightarrow WW$  などの反応は、電弱ボゾンの多点結合など、新物理に感度が高い。これらの LHeC での生成確率そのものはより高い重心系エネルギーを持つ LHC などのほうが大きい、電子が点状粒子であることから、陽子が多粒子状態  $Y$  になる反応 ( $p \rightarrow Y + \gamma$  からの  $\gamma$  が反応する) もバックグラウンド少なくともとらえることができる。この断面積を、ポーランド AGH 大学の Piotrkowski 氏らと計算し、LHeC が LHC に匹敵する pb オーダーの大きな反応断面積を持ち(図 4)、バックグラウンドが少ないことから新物理などに感度が高い可能性を示唆し、[5]などで発表した。

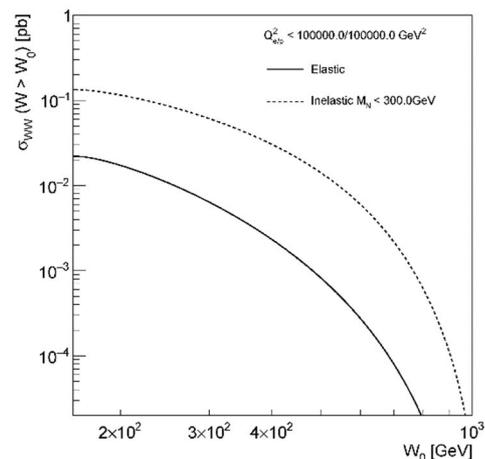


図 3 LHeC での  $\gamma\gamma \rightarrow WW$  断面積

##### D. ZDC の放射線量の見積り

前述のように、研究が始まったのちに EIC での陽子ビームエネルギーが主に 275GeV での運転と決まり、放射線量の増加が懸念された。これについて、神戸大の研究生、理化学研究所の清水氏、および米国のカンザス大、Old Dominion 大らの研究者と協力してシミュレーションを行った。前方中性子の分布は、前述の OPE が適切なモデルであれば、おもにその縦方向の割合  $x_L$  の関数で、その分布は横方向運動量の広がりとともに散乱のエネルギーには大きくよらず、ほぼ一定であると考えられている。神戸大研究生(当時)は、この仮定の下に放射線量を中性子のエネルギーの関数(20-200GeV)として求め、タンゲステン吸収体とするカロリメーターの単位体積(単位質量)あたりにハドロンシャワーによって生じるイ

オン化エネルギーによる放射線線量がエネルギーの約 1.4 乗に比例、つまり急速に増加することを示した(図 4)。

これを受けて Jefferson Lab の研究者が中性子シミュレーションを行い、EIC 運転の中性子量が 4 年間で約  $1 \times 10^{14}$  neutrons (1 MeV 相当換算) に達することが分かった。この放射線量の下で実現可能なカロリメーターは、現在の技術では、(a) シリコン荷電粒子検出器をシャワーの粒子検出とするサンドイッチ型 (b) 最新の全吸収型無機結晶シンチレーター (c) クォーツファイバーで粒子検出するチェレンコフ型、のどれかとなる。これをもとに次のカロリメーター設計を行った。

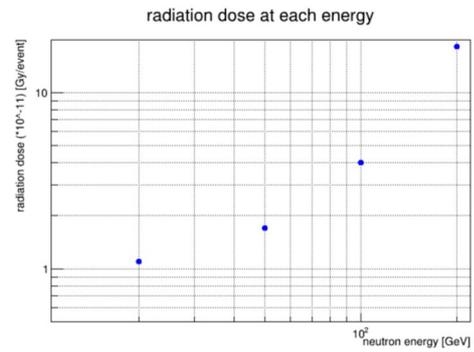


図 4 放射線によるイオン化エネルギーの入射中性子エネルギー依存性

#### E. EIC-ZDC の概念設計

上記の放射線量をもとに、EIC-ZDC の概念設計を行った。まずは理想的なパフォーマンスを目指し、放射線量の多いシャワーの中心部には高放射線耐性の検出器を、コストを度外視して置くこととした。電磁カロリメーター部は ZDC が低エネルギー (300 MeV) の光子も測定する必要があることから、まず無機結晶 (PbWO<sub>4</sub>, LYSO 等) を、次にシリコン検出器パッドの層を置き、ハドロン部の前半は同じく線量が多いことからシリコン検出器のサンドイッチ、最背部はシンチレーターと鉛のサンドイッチとした(図 5)。理化学研究所の清水氏がこれをシミュレーションに組み込み、EIC が要求する性能を満たしていることを示した。

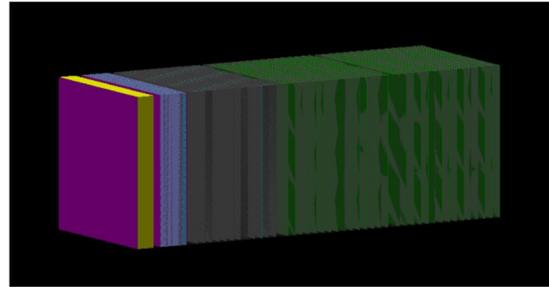


図 5: EIC 実験用シミュレーションに組み込まれた ZDC

現在、これを発展させて東アジア諸国(台湾、韓国、日本)が連携して ZDC の開発を行っている。2023 年 3 月にはアジアでワークショップを開き[6]、上記の検出器が性能ではおおむね十分であるもの、コストが高いことが議論された。これを受けて、今後低コスト化を推し進めていく。特に高価格のシリコン部について、その多くをプラスチックシンチレーター、クォーツファイバーを粒子測定部として読みだす案が一例として議論されている。

#### F. EIC-ZDC 放射線耐性の弱い部分の検出器開発

上記の概念設計では、放射線にあまり強くないプラスチックシンチレーターを後背部に限定するなどして、粒子検出部自体の放射線耐性は確保している。ただし、シンチレーターの光読み出しには一考を要する。コンパクトな多チャンネルプレート光電子増倍管は放射線損傷に比例して内部に電荷が蓄積する問題があったが、これを解決しており、再背部に配置することはできる。しかし、もし結晶を最前部に引き続き置くとすると、検出器の内部に組み込める光検出器のほうで設計の自由度が増し、設置場所の制限なしに最大のサイズの検出器を設置できる。このため、コンパクトな光検出器の APD またはシリコン PM を採用したい。本研究では APD およびシリコン PM の中性子照射試験を理化学研究所で行った。APD は  $10^{12}$  個の中性子に耐えることができなかった。このため、まず中性子の強度を落とし、シリコン PM を試験したところである。光検出器は今後も ZDC 設計の障壁となるため、継続して様々なシリコン PM の試験を行っていく。

#### 関連文献、国際学会発表

1. 査読付き論文 P. Agostini, Y. Yamazaki 他, “The Large Hadron-Electron Collider at the HL-LHC”, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 48 (2021) 110501.
2. 国際研究グループ学会 Y. Yamazaki, “Forward Detectors”, *ELECTRONS FOR THE LHC: Workshop on the LHeC, FCC-eh and PERLE*, 2019 年 10 月 24,25 日, Chavannes de Bogis, Switzerland
3. 国際学会 Y. Yamazaki, “The Updated LHeC Detector”, 40th International Conference on High Energy Physics ICHEP2020 (オンライン); Yuji Yamazaki, “An Experiment for Electron-Hadron Scattering at the LHC”, Offshell-2021 The virtual HEP conference on Run4@LHC (オンライン)

4. 国際研究グループ学会 Y. Yamazaki, “The LHeC and FCC-eh Detector Design”, ELECTRONS FOR THE LHC: Workshop on the LHeC, FCC-eh and PERLE, 2022年10月26-28日, IJCLab-Orsay, France
5. 国際学会 Krzysztof Piotrzkowski(Louvain U., CP3), Yuji Yamazaki, “New electroweak challenges and opportunities at the LHeC”, Proceedings of Science EPS-HEP2021(2022)486 (オンライン)
6. 国際研究グループ学会 Y. Yamazaki “ZDC Overview”, EIC Asia Workshop, 2023年3月16-18日, 理化学研究所和光キャンパス

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Krzysztof Piotrkowski(Louvain U., CP3), Yuji Yamazaki	4. 巻 -
2. 論文標題 New electroweak challenges and opportunities at the LHeC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science EPS-HEP2021	6. 最初と最後の頁 486 (3ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.398.0486	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.D. J. Andre, Y. Yamazaki 他24名	4. 巻 C 82
2. 論文標題 An experiment for electron-hadron scattering at the LHC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Physical Journal	6. 最初と最後の頁 40 (26ページ)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-021-09967-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 P. Agostini, Y. Yamazaki 他 335名	4. 巻 48
2. 論文標題 The Large Hadron-Electron Collider at the HL-LHC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 110501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/abf3ba	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Krzysztof Piotrkowski(Louvain U., CP3)
2. 発表標題 New electroweak challenges and opportunities at the LHeC
3. 学会等名 European Physical Society conference on high energy physics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水志真
2. 発表標題 EIC計画へ向けた超前方カロリメータのデザイン開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回(2022年)年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuji Yamazaki
2. 発表標題 An Experiment for Electron-Hadron Scattering at the LHC
3. 学会等名 Offshell-2021 The virtual HEP conference on Run4@LHC (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎祐司
2. 発表標題 The Updated LHeC Detector
3. 学会等名 40th International Conference on High Energy Physics ICHEP2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎祐司
2. 発表標題 Forward Detectors
3. 学会等名 ELECTRONS FOR THE LHC: Workshop on the LHeC, FCC-eh and PERLE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	カンザス大学	Brookhaven研究所	Jefferson Laboratory	他2機関
英国	リバプール大学	バーミンガム大学		
ドイツ	DESY研究所			
イタリア	INFNボローニャ研究所			
ポーランド	AGH科学技術大学			
スイス	CERN研究所			
英国	リバプール大学	バーミンガム大学		