

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ  
МНОГОЭТАПНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ  
ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ОСНОВЕ  
ФРЕЙМВОРКА GAUDI**

Научный руководитель  
доц. к.ф-м.н.

\_\_\_\_\_ Е. Ю. Солдатов

Научный консультант  
к.ф-м.н.

\_\_\_\_\_ А. С. Жемчугов

Студент

\_\_\_\_\_ Л. Л. Симбирятин

Москва 2023

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Эксперимент SPD</b>	<b>4</b>
1.1 Основная цель эксперимента . . . . .	4
1.2 Детектор . . . . .	5
<b>2 Фреймворк Gaudi</b>	<b>6</b>
2.1 Архитектура Gaudi . . . . .	6
2.2 Алгоритмы и основные сервисы . . . . .	7
2.3 Работа Gaudi-приложения . . . . .	8
<b>3 Место Gaudi в программном обеспечении SPD</b>	<b>9</b>
3.1 Текущий статус . . . . .	9
<b>Список использованных источников</b>	<b>10</b>

# 1 Введение

2 Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) является  
3 проектом масштаба мегасайенс, реализуемым на базе ОИЯИ (Дубна, Россия). На кол-  
4 лайдере предусмотрены две точки пересечения пучков заряженных частиц, в одной из  
5 которых предполагается установить детектор SPD (Spin Physics Detector) с целью изу-  
6 чения спиновой структуры протона и дейтрона. Коллайдер предоставляет уникальную  
7 возможность для изучения поляризованных  $pp$  и  $dd$  столкновений с  $\sqrt{s} = 27$  ГэВ и  
8 светимостью порядка  $10^{32}$  см $^{-2}$ с $^{-1}$ .



Рисунок 1 — Ускорительный комплекс NICA

9 Как и любой крупный эксперимент, SPD предполагает разработку своего физи-  
10 ческого ПО. Такое ПО, главным образом, предназначено для реконструкции событий,  
11 генерации наборов Монте-Карло симуляций, а также для автономной обработки дан-  
12 ных.

13 Текущим вариантом физического ПО эксперимента SPD является пакет SpdRoot,  
14 написанный на основе фреймворка FairRoot [1]. С его помощью рассчитывают физи-  
15 ческие показатели детектора, производят возможные оптимизации и прочие подготови-  
16 тельные мероприятия. Однако, являясь непосредственным наследником пакета Root,  
17 SpdRoot наследует, в том числе, и все его недостатки. Root является главным образом  
18 инструментом анализа, изначально он не был предназначен для вышеперечисленных  
19 целей, что приводит к периодически возникающим программным сбоям. Также физи-  
20 ческое ПО должно быть эффективным с точки зрения использования вычислитель-  
21 ных ресурсов, так как от этого напрямую зависит скорость обработки данных. Чтобы  
22 воспользоваться достижениями современного вычислительного оборудования (большое  
23 число CPU, использование GPU), в ПО должны поддерживаться методы многопоточ-  
24 ного программирования, что является недоступным в SpdRoot.

25 По этим причинам к началу набора данных необходимо разработать фреймворк  
26 для физического ПО эксперимента SPD на базе Gaudi [2]. В рамках прошедшего се-  
27 местра были выполнены следующие задачи:

- 28 • обзор принципов построения ПО современного физического эксперимента;
- 29 • знакомство с фреймворком Gaudi;
- 30 • создание простого алгоритма, реализующего работу с промежуточным хранили-  
31 щем данных Gaudi;

# 32 1 Эксперимент SPD

33 Несмотря на важность поиска проявлений частиц, выходящих за рамки Стан-  
 34 дартной модели, в рамках барионной материи по-прежнему остается множество откры-  
 35 тых вопросов. Даже протон не может считаться в полной мере изученной частицей. В  
 36 наивной кварковой модели протон представляет собой комбинацию двух  $u$  и одного  $d$   
 37 кварка. Эта простейшая кварковая модель позволяет предсказать такие свойства как  
 38 электрический заряд, изоспин, четность, магнитный момент. Этот результат является  
 39 действительно удивительным, ведь такая модель не учитывает угловые моменты квар-  
 40 ков, морские кварки, а также глюоны. КХД является современным инструментом опи-  
 41 сания сильного взаимодействия, она с успехом применяется для описания множества  
 42 процессов. Основным нюансом КХД является ее непертурбативность на низких энер-  
 43 гиях, в частности, одной из нерешенных проблем остается описание свойств адронов (в  
 44 том числе и протона) напрямую из динамики составляющих их кварков и глюонов.

45 Детектор SPD (Spin Physics Detecror) будет размещен в одной из двух точек  
 46 столкновения пучков коллайдера NICA (Дубна, Россия). Целью построения SPD явля-  
 47 ется изучение спиновой структуры нуклонов в поляризованных  $pp$  ( $\sqrt{s} < 27$  ГэВ) и  $dd$   
 48 ( $\sqrt{s} < 13.5$  ГэВ) столкновениях.

## 49 1.1 Основная цель эксперимента

50 Одним из способов описания внутренней партонной структуры нуклона является  
 51 использование функций партонных распределений PDF (Parton Distribution Function).  
 52 В неполяризованном простейшем случае эта функция описывает вероятность найти  
 53 внутри нуклона партон, несущий определенную долю общего импульса. В общем же  
 54 случае необходимо также учитывать не только продольную компоненту, но и попереч-  
 55 ную (например, эффект Сиверса [3]), а также поляризацию как самого нуклона, так и  
 56 партонов внутри него.

57 В то время как вклад кварков в общий спин нуклона был довольно точно измерен  
 58 коллаборациями EMC, HERMES и COMPASS, измерения по глюонной компоненте либо  
 59 являются менее точными, либо отсутствуют вовсе.

60 Основная цель эксперимента SPD - извлечь информацию о глюонных функци-  
 61 ях распределения, зависящих от поперечного импульса (TMD PDFs), для протона и  
 62 дейтрона, через измерение одинарных и двойных спиновых асимметрий в процессах  
 63 рождения чармониев, очарованных частиц, а также прямых фотонов [4].

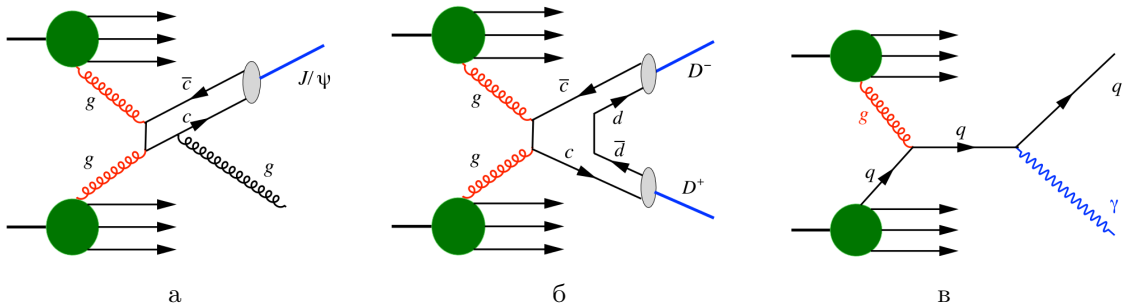


Рисунок 2 — Фейнмановские диаграммы процессов-пробников: рождение (а) чармониев, (б) очарованных частиц, (в) прямых фотонов

## 64 1.2 Детектор

65 Основной целью эксперимента является извлечение TMD PDF для глюонов че-  
66 рез измерение спиновых асимметрий в процессах рождения чармониев, очарованных  
67 частиц, а также прямых фотонов. Поставленная цель, а также обозначенные процессы-  
68 пробники определяют вид и необходимые характеристики детектора SPD.

69 SPD представляет собой универсальный  $4\pi$  детектор с характерной для коллай-  
70 дерных экспериментов цилиндрической формой. Его компонентами являются:

- 71 • кремниевый вершинный детектор (VD) с разрешением выше 100 мкм для рекон-  
72 структурирования вторичных вершин распадов  $D$  мезонов;
- 73 • трековая система (TS)  $\sigma_{p_T}/p_T \approx 2\%$ ;
- 74 • время-пролетная система (TOF) с разрешением порядка 60 пс для разделения  
75  $\pi/K$  и  $K/p$ ;
- 76 • детектор FАRICH для улучшения разделения  $\pi/K$  и  $K/p$ ;
- 77 • электромагнитный калориметр (ECal) с энергетическим разрешением  $\sim 5\%/\sqrt{E}$   
78 для регистрации фотонов;
- 79 • мюонная система (RS);
- 80 • пара счетчиков столкновений (BBC) и калориметров нулевых углов (ZDC) для  
81 контроля поляризации и светимости;

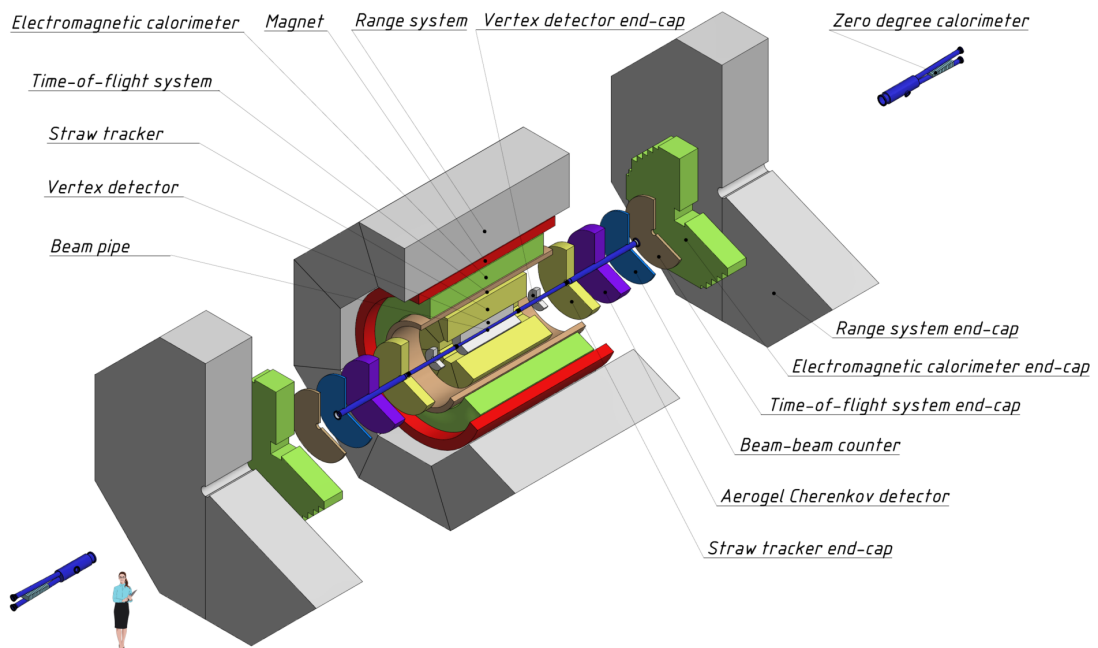


Рисунок 3 — Макет детектора SPD в полной сборке

82 В силу трудностей, возникающих при построении аппаратного триггера, для SPD  
83 предполагается безтриггерная система сбора данных. В совокупности с высокой частотой  
84 столкновений (до 12 МГц) и сотнями тысяч каналов детектора это представляет  
85 собой сложную задачу по разработке эффективной системы сбора и обработки данных.

## 86 2 Фреймворк Gaudi

87 Gaudi [2] представляет собой программный пакет, содержащий все необходимые  
88 интерфейсы и компоненты для написания на его основе фреймворков для эксперимен-  
89 тов в области физики высоких энергий. Изначально Gaudi разрабатывался по внут-  
90 ренним нуждам коллаборации LHCb, однако вскоре после подключения к разработке  
91 коллаборации ATLAS стало ясно, что пакет может быть легко трансформирован и под  
92 любой другой эксперимент. Надежность пакета подтверждается его использованием в  
93 многочисленных коллаборациях по всему миру.

### 94 2.1 Архитектура Gaudi

95 Одним из принципиальных решений при создании Gaudi стала изоляция поль-  
96 зователя от деталей внутреннего устройства фреймворка. Достигается такая изоляция  
97 за счет построения архитектуры, представляющей собой набор компонентов и правил  
98 их взаимодействия. У каждого компонента есть свой интерфейс и функционал. Задача  
99 же пользователя сводится к доопределению функционала конкретного компонента с  
100 сохранением его интерфейса. Программно это осуществляется путем наследования от  
101 одного из базовых классов.

102 Другим принципиальным решением стало жесткое разделение между данными и  
103 алгоритмами, оперирующими этими данными. Такое разделение обусловлено естествен-  
104 ным подходом: данные - это набор чисел, который не стоит перегружать каким-либо  
105 дополнительным функционалом, а алгоритмы - это математические процедуры, прово-  
106 димые с этими числами. Также для хранения данных на диске необходимо предоста-  
107 вить соответствующие конвертеры. Таким образом, в Gaudi представлены следующие  
108 базовые классы, предназначенные для пользователя:

- 109 • DataObject
- 110 • Algorithm
- 111 • Converter

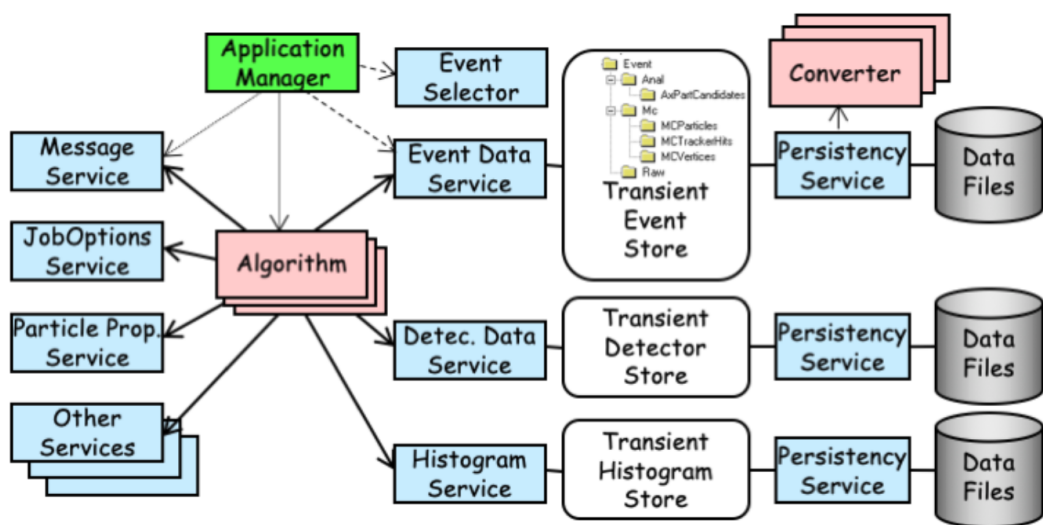


Рисунок 4 — Основные компоненты архитектуры Gaudi

## 112 2.2 Алгоритмы и основные сервисы

113 Алгоритмы главным образом производят определенные действия с данными (ге-  
114 нерация, реконструкция и т. п.), основная часть модификации фреймворка под нужды  
115 конкретного эксперимента заключается в написании алгоритмов.

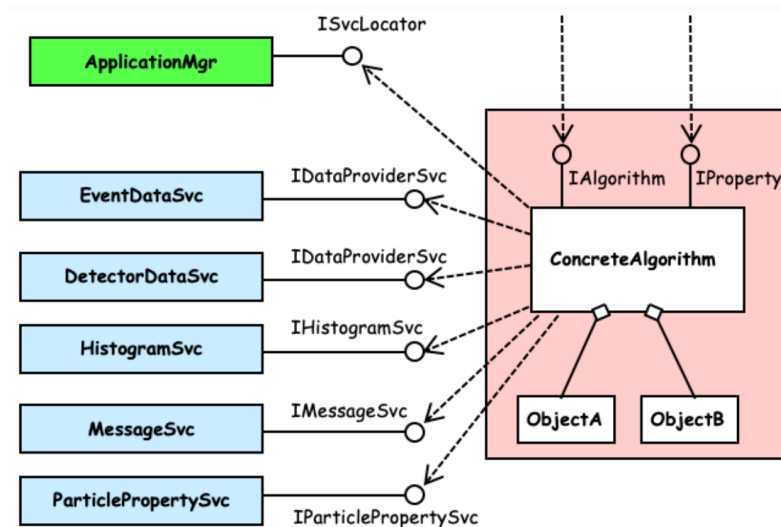


Рисунок 5 — Взаимодействие алгоритма с фреймворком в процессе работы

116 Алгоритм взаимодействует с элементами фреймворка посредством их интерфей-  
117 сов. Например, доступ к данным и их запись во временное хранилище осуществляется  
118 посредством интерфейса IDataProviderSvc, а в случае необходимости вывода алгорит-  
119 мом какой-либо информации можно воспользоваться MessageSvc, обращение к которо-  
120 му реализуется через интерфейс IMessageSvc.

121 Алгоритм является конфигурируемым. Так, перед запуском можно установить  
122 значения для внутренних переменных (например, пороговые значения для отборов со-  
123 бытий). Это возможно благодаря тому, что базовый класс Algorithm реализует сразу  
124 два интерфейса, в том числе IProperty, что дает возможность сервису JobOptionSvc в  
125 момент конфигурирования обращаться к полям алгоритма и задавать их значения. Вто-  
126 рым интерфейсом, который реализуется базовым классом Algorithm, является IAlgorithm.  
127 IAlgorithm используется для управления алгоритмом в процессе работы фреймворка.  
128 Также этот интерфейс содержит три чисто виртуальных метода, реализация которых  
129 целиком ложится на конечного пользователя:

- 130 • **Initialize**, который может быть использован для создания выходных гистограмм,  
131 конфигурирования побочных алгоритмов и т.п.
- 132 • **Execute**, который вызывается единожды на событие и совершает соответствующе-  
133 е какой-либо физической задаче преобразования над данными, относящимися к  
134 этому событию. Для побочных алгоритмов execute можно вызывать более одного  
135 раза.
- 136 • **Finalize**, который вызывается в конце работы программы и может быть исполь-  
137 зован для подведения итоговой статистики, фитирования итоговых гистограмм и  
138 т.п.

139 **2.3 Работа Gaudi-приложения**

140        Общая схема работы приложения, написанного на базе Gaudi, представлена на  
 141 рисунке 6:

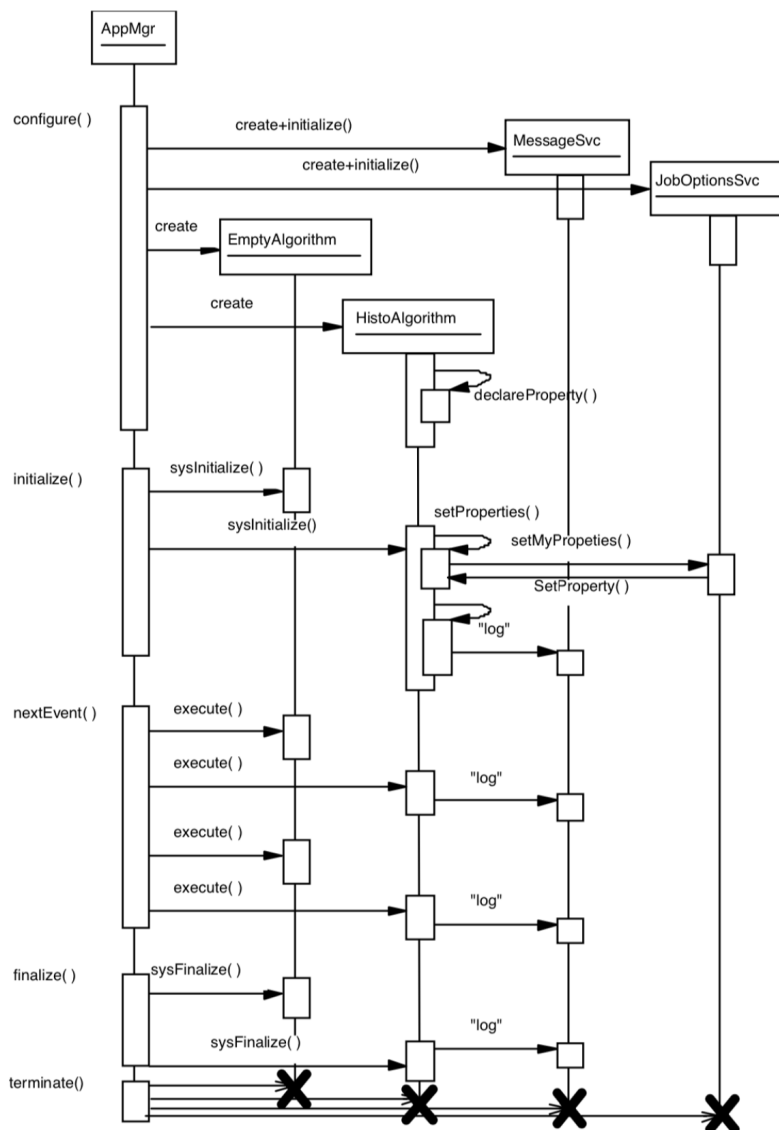


Рисунок 6 — Общая схема работы Gaudi-приложения

142        Порядок работы следующий:

- 143        • Application manager создает и инициализирует необходимые сервисы;
- 144        • создаются алгоритмы, указанные в JobOptions;
- 145        • устанавливаются свойства алгоритмов;
- 146        • Application manager начинает цикл обработки событий. Для каждого события вы-  
 147 зываются алгоритмы в установленном порядке;
- 148        • по завершении цикла обработки событий алгоритмы завершаются;
- 149        • сервисы завершаются;
- 150        • освобождаются все ресурсы, программа завершается;



## 151 3 Место Gaudi в программном обеспечении SPD

152 С целью вынесения описания геометрии и материалов детектора за рамки фрейм-  
153 ворка будет использоваться библиотека GeoModel [5].

154 Моделирование  $pp$  столкновений осуществляется с помощью генератора Pythia8  
155 [6]. Моделирование  $dd$  столкновений осуществляется с помощью модели FRITIOF [7].  
156 Для моделирования взаимодействия частиц, образовавшихся в столкновении пучков, с  
157 веществом детектора и формирования сигналов в чувствительных элементах установки  
158 SPD используется пакет Geant4 [8].

159 Задачей фреймворка физического ПО является объединение этих процессов в  
160 единую систему, также фреймворк должен содержать все необходимые алгоритмы для  
161 реконструкции и анализа данных.

### 162 3.1 Текущий статус

163 Разработка фреймворка на основе Gaudi только началась. В рамках настоящей  
164 работы в ознакомительных целях был разработан пользовательский класс, представ-  
165 ляющий собой четырехвектор, а также цепочка алгоритмов, позволяющая генерировать  
166 изотропно вылетающие частицы и осуществлять запись смоделированных параметров  
167 на диск.

168 В настоящее время доступен docker-образ, содержащий сборку Gaudi версии  
169 v36r9, а также все необходимые зависимости.

170 Ближайшими задачами являются создание удобной системы сборки с использо-  
171 ванием CMake, а также разработка соответствующих интерфейсов и интеграция Pythia8  
172 и Geant4 в фреймворк.

## 173 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 174 1. The FairRoot framework / M. Al-Turany [и др.] // Journal of Physics: Conference  
175 Series. — 2012. — Дек. — Т. 396, № 2. — С. 022001.
- 176 2. *Mato P.* GAUDI-Architecture design document. — 1998. — Ноябрь.
- 177 3. *Sivers D. W.* Single Spin Production Asymmetries from the Hard Scattering of Point-  
178 Like Constituents // Phys. Rev. D. — 1990. — Т. 41. — С. 83.
- 179 4. On the physics potential to study the gluon content of proton and deuteron at NICA  
180 SPD / A. Arbuzov [и др.] // Prog. Part. Nucl. Phys. — 2021. — Т. 119. — С. 103858. —  
181 arXiv: 2011.15005 [hep-ex].
- 182 5. Going standalone and platform-independent, an example from recent work on the ATLAS  
183 Detector Description and interactive data visualization / S. A. Merkt [и др.] // European  
184 Physical Journal Web of Conferences. Т. 214. — 07.2019. — С. 02035. — (European  
185 Physical Journal Web of Conferences).
- 186 6. An introduction to PYTHIA 8.2 / T. Sjöstrand [и др.] // Comput. Phys. Commun. —  
187 2015. — Т. 191. — С. 159–177. — arXiv: 1410.3012 [hep-ph].
- 188 7. *Andersson B., Gustafson G., Nilsson-Almqvist B.* A model for low-pT hadronic reactions  
189 with generalizations to hadron-nucleus and nucleus-nucleus collisions // Nuclear Physics  
190 B. — 1987. — Т. 281, № 1. — С. 289–309. — ISSN 0550-3213.
- 191 8. GEANT4—a simulation toolkit / S. Agostinelli [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. —  
192 2003. — Т. 506. — С. 250–303.