

---

## РАБОТЫ ПО КВАНТОВОЙ ЗАПУТАННОСТИ

---

# Кто является ведущим игроком в экспериментальном изучении квантовой запутанности? Библиометрический анализ\*

Ю.Д.Се, Ц.Ву, Х.С.Ли, Ю.Гао, П.Чжан, С.Дж.Ву, Ю.Ю.Лю, Н.Чжан

---

*Квантовая запутанность – главный исследовательский ресурс в квантовой информатике, которому в последние годы уделяется все больше внимания и посвящается все больше экспериментальных работ. На основе 7089 научных статей по экспериментам в области квантовой запутанности, полученных из базы данных Web of Science Core Collection, в настоящей работе рассмотрены 400 наиболее цитируемых статей с 498 первыми авторами или авторами-корреспондентами из 188 учреждений 32 стран/территорий. Здесь используются не только традиционные методы полного счета первых авторов и авторов-корреспондентов для представления критически значимых имен, учреждений и стран в качестве разработчиков или исполнителей, но и различающий метод как полного, так и дробного счета первых авторов/авторов-корреспондентов, чтобы выявить доминирующих игроков в области экспериментальных исследований квантовой запутанности. Что касается авторов, то ведущими исследователями в этой области являются A. Zeilinger и J. W. Pan. Наилучшие показатели в этой области среди организаций имеет Венский университет, однако и другие учреждения, такие как Университет науки и технологий Китая, показывают хорошие результаты. Подтверждена репутация США, Германии, Австрии, Великобритании и материкового Китая как доминирующих игроков в данной области.*

*Ключевые слова:* наиболее цитируемые статьи, первый автор/автор-корреспондент, квантовая запутанность, экспериментальное исследование, библиометрический анализ.

## 1. Введение

Бурное развитие квантовой теории в последние годы обусловлено тем, что многие страны и регионы вкладывают большие средства в теоретические разработки с целью захвата лидерства в области квантовых информационных технологий. Например, в США в 2018 г. был принят Закон о национальной квантовой инициативе, чтобы гарантировать сохранение лидирующих позиций в квантовых информационных технологиях. Руководство Китая выбрало квантовую информатику в качестве ключевого проекта своего 13-го пятилетнего плана (2015–2020 гг.), стремясь усилить фундаментальные исследования приложений квантовых информационных технологий. Как существенная часть квантового мира и главный ресурс для квантовой обработки информации [1], квантовая запутанность привлекает все большее внимание академических кругов и правительств в 21 веке.

Обсуждение квантовой запутанности, известной как «эффект бога» [2], стало результатом дебатов о базовой интерпретации квантовой механики в 1935 г. [3], хотя потребовалось много лет, чтобы запутанность действительно начала рассматриваться в лабораториях как новый ресурс, подобно энергии [4]. В 1997 г. группа A. Zeilinger

впервые экспериментально наблюдала результаты квантовой телепортации, основанной на квантовой запутанности. Их работа была отобрана для публикации в 1999 г. в журнале *Nature* (выпуск «A Celebration of Physics»), куда вошла только 21 классическая статья по физике из опубликованных в *Nature* за столетие. Ученик A. Zeilinger, J. W. Pan, которого в Китае называют «отцом кванта» [5], продолжает исследования в области экспериментального применения квантовой запутанности и получает пионерские результаты в Китае. Несомненно, экспериментальное изучение квантовой запутанности может существенно повлиять на развитие квантовой обработки информации как дисциплины, имеющей большое научное значение и перспективы. Чтобы достичь лучшего понимания и получить общее представление об экспериментальных исследованиях квантовой запутанности, в настоящей статье для подтверждения вклада ученых, прошедшего экспертную оценку, и определения научных рекомендаций для исследователей и правительств используется количественный анализ.

Библиометрические исследования применялись для оценки и картирования обмена научной информацией по многим общим предметам, подобластям и темам исследований [6]. Многочисленные исследования статей с высокой цитируемостью относятся к различным областям, рассматриваемым на разных уровнях. В качестве примера общих предметных оценок можно привести исследования в областях экономики и бизнеса [7], к оценкам подобластей относятся исследования операций и управления [8] и работы в области химической инженерии [9], а к оценкам конкретных тем можно отнести исследования Антарктики [10] и исследования периода Второй мировой войны [11]. В некоторых работах содержались библиометрические оценки в области физики, включая ис-

---

\* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

Y. D. Xie, Q. Wu, X. C. Li, Y. Gao, P. Zhang, S. J. Wu, Y. Y. Liu, N. Zhang, School of Management, University of Science and Technology of China, 96 Jinzhai Road, Hefei 230026, China; e-mail: qiangwu@ustc.edu.cn

следования в отдельных областях физики [12, 13], оптики [14], ядерных науки и технологий [15], наноматериалов и нанотехнологий [16, 17], дозиметрии излучения [18] и квантовой криптографии [19]. В частности в [20] использованы улучшенные библиометрические индикаторы, основанные на алгоритме PageRank, для ранжирования авторов, учреждений, стран и т.д. в области фундаментальной физики. В некоторых исследованиях были рассмотрены статьи по космической физике с высоким рейтингом цитируемости [21]. Однако, несмотря на все сказанное, очевидно, что в области физики исследований по высокоцитируемым статьям, особенно по «горячим» темам, все еще недостаточно. Поэтому в настоящей работе основное внимание уделяется наиболее цитируемым экспериментальным статьям по квантовой запутанности, чтобы восполнить пробел в библиометрических исследованиях.

Библиометрический метод применяется для изучения вклада и распределения различных субъектов, таких как журналы, авторы, учреждения и страны/территории (далее именуемые просто «страны»). Для количественной оценки участия и вклада различных субъектов используются известные методы полного и дробного счета [22]. Еще важнее то, что, согласно [22], первый автор и автор-корреспондент во многих публикациях различаются, и это указывает на важность вклада автора-корреспондента. Существует консенсус, что и первый автор, и автор-корреспондент играют доминирующую роль и занимают важные позиции в проекте [23, 24], чему были посвящены предыдущие исследования [10, 25, 26]. Авторы [27] разработали новый индекс, названный  $Y$ -индексом и включающий два фактора,  $j$  и  $\theta$ , для оценки научной продуктивности первого автора и автора-корреспондента. Фактор  $j$  связан с числом публикаций первого автора и автора-корреспондента, а коэффициент  $\theta$  определяет характер этих публикаций. Параллельно с этим существуют общепризнанные проблемы с установлением первого автора или автора-корреспондента. Например, фамилии авторов некоторых статей расположены в алфавитном порядке, а в некоторых журналах автор-корреспондент не указывается вообще. В отличие от индекса  $Y$ , в настоящем исследовании используется простой различающий метод, который применялся на практике, но не проверялся теоретически. Здесь он назван методом полного счета первых авторов/авторов-корреспондентов, чтобы дать представление о доминирующих игроках, имеющих сложившуюся репутацию в рассматриваемой области.

Основная цель настоящей работы – изучить распределение и вклад статей по экспериментальным исследованиям квантовой запутанности, включающим ее экспериментальное обнаружение, измерение и применение, на основе Web of Science Core Collection (WoSCC) с учетом годичной продукции, числа цитирований, наиболее цитируемых статей, журналов, стран, учреждений и авторов. В настоящей работе используются не только традиционные методы полного счета первых авторов и авторов-корреспондентов для представления критически значимых имен, учреждений и стран в качестве разработчиков или исполнителей, но и различающий метод как полного, так и дробного счета первых авторов/авторов-корреспондентов, чтобы выявить доминирующих игроков в области эксперимента по квантовой запутанности.

Статья имеет следующую структуру. В разд.2 представлены данные и методы. В разд.3 описаны результаты

анализа данных, касающихся распределения по годам, цитирований статьи, а также наиболее цитируемых статей, журналов, авторов, учреждений и стран. Наконец, разд.4 завершается обсуждением основных выводов.

## 2. Данные и методы

### 2.1. Сбор информации

Материалы, использованные в настоящей статье, были получены из баз данных Science Citation Index Extended Edition (SCIE), Social Science Citation Index (SSCI) и Conference Literature Citation Index Science Citation (CPCI) в WoSCC от Thomson Reuters. С использованием «TS = (ent angl  $\times$  AND Quantum  $\times$  AND Experiment) AND PY = (1900–2019)» в качестве формулы поиска в настоящей работе была рассмотрена вся литература в области эксперимента по квантовой запутанности с 1900 по 2019 г. Данные поиска были собраны к 9 декабря 2020 г., после чего была получена выборка из 8635 опубликованных статей. Мы называем ее базовой выборкой. Затем все результаты, использованные в этой статье, были вручную обработаны шестью аспирантами в течение нескольких месяцев.

Наиболее цитируемая литература об экспериментах в области квантовой запутанности была получена из базовой выборки. Чтобы подчеркнуть оригинальность работы, из базовой выборки были извлечены публикации с типами документов «статья», «исходная статья» и «заметка»; всего было получено 8330 статей, с исключением публикаций раннего доступа (не проходящих рецензирования) и отозванных статей. Выбранные статьи были отсортированы по числу цитирований (от большего к меньшему), и первые 5% статей были включены в выборку самых цитируемых статей в области экспериментов по квантовой запутанности. Таким образом, всего было получено 419 наиболее цитируемых статей, минимальное количество цитирований которых на дату сбора (9 декабря 2020 г.) составляло 140, что было обозначено как TC2019  $\geq$  140. Однако учитывая, что в WoSCC есть ошибки в классификации литературы, исследование потребовало проверки и повторной классификации данных [28]. Например, большинство статей в журнале *Reviews of Modern Physics* относятся к категории «обзор», тогда как многие из публикаций этого журнала классифицируются WoSCC как «статья». Поэтому из исследования вручную были исключены еще 19 статей этого журнала. В итоге было выбрано в общей сложности 400 самых цитируемых статей с TC2019  $\geq$  140, опубликованных с 1992 г.

### 2.2. Методы

Библиометрический анализ, введенный в работе [29], рассматривается как комплексный метод оценки и все чаще используется в различных областях науки [30]. Благодаря качественным и количественным преимуществам библиометрического анализа в настоящем исследовании он используется для оценки научного вклада и распределения журналов, стран, учреждений, авторов и др. Основные библиометрические методы, включая методы полного и дробного счета, в частности полный и дробный счет по первому автору/автору-корреспонденту, были применены для представления вклада и распределения субъектов данного исследования. В настоящее время

полный и дробный счет широко используются многими учеными и учреждениями для количественного представления важности различных объектов, например в базе данных Nature Index.

*Полный счет* означает, что каждый соавтор записывается как равный при заполнении документа, а вклад каждого соавтора в документ засчитывается как единица. Что касается вкладов стран/организаций, то статистический метод аналогичен методу для авторов. Учитывая, что первый автор или автор-корреспондент несет основную ответственность за работу, мы используем три метода: *полный счет первых авторов*, *полный счет авторов-корреспондентов* и *полный счет первых авторов/авторов-корреспондентов*. Рассмотрим первые два метода. *Полный счет первых авторов* означает, что каждый первый автор имеет одинаковый вес, равный единице. *Полный счет авторов-корреспондентов* означает, что вес каждого автора-корреспондента также считается равным единице. Кроме того, если первый автор и автор-корреспондент статьи являются представителями различных организаций или стран, вес «единица» присваивается этим учреждениям или странам.

Третий метод – *полного счета первых авторов/авторов-корреспондентов*, рассматривает только первого автора и автора-корреспондента, которые считаются доминирующими игроками, имеющими репутацию в данной области. Например, в документе, написанном в соавторстве, первому автору и автору-корреспонденту присваивается вес, равный единице, а другим соавторам – ноль. Кроме того, каждая страна и учреждение первого автора и автора-корреспондента также имеют вес, равный единице. В особом случае, когда авторы расположены в алфавитном порядке, в настоящем исследовании все авторы рассматриваются как первый автор и каждый получает вес, равный единице.

Напротив, *дробный счет* на уровне автора означает, что каждый автор имеет одинаковый вес, но сумма весов должна равняться единице, т.е. в документе, созданном в соавторстве, вклад каждого соавтора в документ одинаков независимо от их рейтинга. Например, если у доку-

мента  $n$  соавторов, вклад каждого соавтора в документ засчитывается как  $1/n$ . Кроме того, если соавтор статьи представляет  $g$  стран, то  $1/n$  делится поровну между странами аффилиации соавтора. Метод аналогичен *дробному счету* и *полному счету первых авторов/авторов-корреспондентов*; в данной работе также строится метод *дробного счета первых авторов/авторов-корреспондентов*.

### 3. Результаты

#### 3.1. Анализ публикаций

Как объяснялось выше, из WoSCC было извлечено 5%, или 400 наиболее цитируемых с 1992 г. статей (TC2019  $\geq 140$ ) в области экспериментов по квантовой запутанности. На рис. 1 показано распределение этих статей и число цитирований на статью до 2019 г. Видны большие различия в распределении наиболее цитируемых статей по годам. Число наиболее цитируемых статей росло медленно, но заметно увеличилось в 1998 и 2001 гг. Наибольшее число цитируемых статей – 35, т.е. 8.75% от общего числа, пришлось на 2003 г., за ним следовали 2010 и 2002 гг. с 34 и 30 статьями (8.50% и 7.50%) соответственно. Однако до 1997 г. было опубликовано только пять наиболее цитируемых статей, а в 1994 и 2019 гг. не появилось ни одной статьи с высоким цитированием.

Что касается количества цитирований на статью (citations per paper, CPP), то необходимо время, чтобы статья накопила количество цитирований [31]. Только шесть лет (1993, 1995, 1996, 1997, 1998 и 2001 гг.) имели CPP  $\geq 500$ , и все они были обнаружены на ранней стадии периода нашего исследования. В частности в 1993 и 1995 гг. вышло по одной статье, имевших 1147 и 1127 цитирований соответственно. За ними следует 1997 г. с CPP = 802.17. Эти показатели достигнуты за счет статей «Эксперимент Белла с детекторами, готовыми к событиям» [32], «Оптическое отображение с помощью двухфотонной квантовой запутанности» [33] и «Экспериментальная квантовая телепортация» [34]. Напротив, в последние годы CPP составляет менее 300, за исключени-

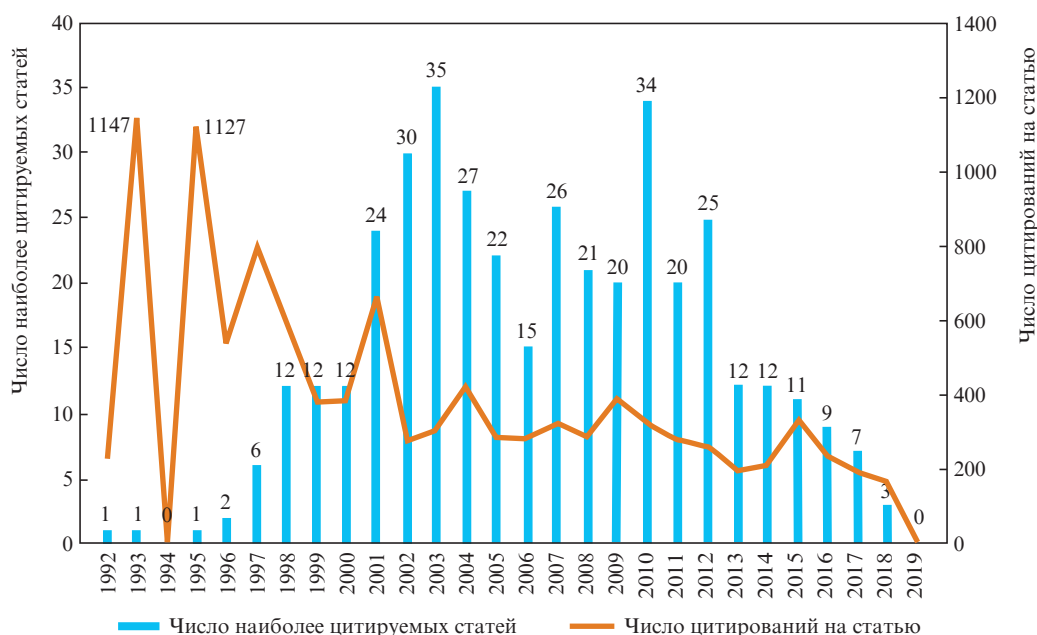


Рис. 1. Число наиболее цитируемых статей и цитирований на статью до 2019 г.

ем 2015 г., что также отражает преимущество в цитируемости ранее опубликованных статей [35].

### 3.2. Анализ журналов

Рассматриваемые 400 наиболее цитируемых статей (5% общего числа) были опубликованы в 38 журналах. В табл.1 представлено распределение по семи ведущим журналам, в которых было опубликовано не менее десяти наиболее цитируемых статей, что составляет 87% от их общего количества. Самым продуктивным журналом был *Physical Review Letters* ( $IF_{2019} = 8.385$ ) с 135 статьями, что составляет 33.75% от общего количества. За ним следует *Nature* со 101 наиболее цитируемыми статьями; это 25.25%, но *Nature* имеет самый высокий импакт-фактор (42.779) из этих двух журналов. Только в них опубликовано не менее 100 самых цитируемых статей. Третий журнал, с 49 наиболее цитируемыми статьями, – это *Physical Review A* ( $IF_{2019} = 2.777$ , что составляет 12.25%). Хотя широко известный журнал *Science* имеет второй по величине импакт-фактор, 41.846, он занимает только пятое место с 15 статьями (3.75%). Это указывает на то, что наиболее цитируемые статьи не всегда могут быть опубликованы в многопрофильных журналах с высокими импакт-факторами [23, 36].

Как показано в табл.1, большинство цитируемых статей попадает в категорию «мультидисциплинарная физика», а затем разделяется на мультидисциплинарные науки, оптику и другие категории. В настоящем исследовании также учитывалось, относятся ли эти девять ведущих журналов к базе данных Nature Index. За исключением *New Journal of Physics*, остальные шесть журналов являются журналами Nature Index, т.е. наиболее цитируемые статьи распространяются в широко известных журналах.

### 3.3. Анализ авторов

Рассматриваемые 400 самых цитируемых статей представлены 498 первыми авторами или авторами-корреспондентами. В табл.2 перечислены 15 лучших авторов как минимум четырех статей ( $F/CUP \geq 4$ ). Пять ведущих ученых (33.33%) выполнили свои исследования в Австрии. На втором месте находятся США и материковый Китай (по три ученых), за ними следует Австралия с двумя учеными. Каждая из остальных стран (Германия, Нидерланды, Великобритания, Франция и Италия) представлена одним ученым. J.W.Pan, опубликовавший 17 статей, занимает первое место среди всех авторов, за ним следует A.Zeilinger (16 статей), их сумма значительно превышает число статей других авторов. Более того, есть

Табл.1. Семь журналов с наибольшим числом самых цитируемых статей ( $FUP \geq 10$ ).

Журнал	TP (%)	$IF_{2019}$	Категория JCR	NIJ
<i>Physical Review Letters</i>	135 (33.75)	8.385	Междисциплинарная физика	Да
<i>Nature</i>	101 (25.25)	42.779	Междисциплинарные науки	Да
<i>Physical Review A</i>	49 (12.25)	2.777	Оптика; атомная, молекулярная и химическая физика	Да
<i>Nature Physics</i>	28 (7.00)	19.256	Междисциплинарная физика	Да
<i>Science</i>	15 (3.75)	41.846	Междисциплинарные науки	Да
<i>Nature Photonics</i>	10 (2.50)	31.241	Оптика; прикладная физика	Да
<i>New Journal of Physics</i>	10 (2.50)	3.539	Междисциплинарная физика	Нет

Примечание: TP (%) – общее число и процент наиболее цитируемых статей;  $IF_{2019}$  – импакт-фактор 2019 г.; категория JCR – категория Journal Citation Reports; NIJ – журналы Nature Index (Да/Нет).

Табл.2. Первые 15 авторов с  $F/CUP \geq 4$ .

Автор	Страна	F/CUP	R	F/CRP	R	FUP	R	CUP	R
Pan J.W	Континентальный Китай	17	1	6.83	2	5	1	13	2
Zeilinger A.	Австрия	16	2	7.25	1	2	15	16	1
Pryde G.J.	Австралия	7	3	2.75	13	2	15	6	3
Lukin M.D.	США	6	4	2.42	16	1	45	5	4
Duan L.M.	Китай	5	5	4.00	3	4	3	4	5
Lanyon B.P.	Австрия	5	5	3.50	4	5	1	2	22
Peng C.Z.	Китай	5	5	1.92	31	1	45	4	5
Vaziri A.	Австрия	4	8	3.25	5	4	3	1	44
Tittel W.	Нидерланды	4	8	3.25	5	4	3	–	–
Barreiro J.T.	США; Австрия	4	8	3.25	5	4	3	1	44
Braunstein S.L.	Соединенное Королевство	4	8	3.17	8	4	3	3	10
Leibfried D.	США	4	8	2.83	12	4	3	2	22
Haroche S.	Франция	4	8	2.00	20	–	–	4	5
Sciarrino F.	Италия	4	8	1.67	36	–	–	4	5
Aspelmeyer M.	Австрия	4	8	1.58	37	1	45	4	5

Примечание: F/CUP – общее количество наиболее цитируемых статей на основе полного счета первых авторов/авторов-корреспондентов; F/CRP – общее количество наиболее цитируемых статей на основе дробного счета первых авторов/авторов-корреспондентов; FUP – общее количество наиболее цитируемых статей на основе полного счета первых авторов, CUP – общее количество наиболее цитируемых статей на основе полного счета авторов-корреспондентов; R – рейтинг.

большие различия в научном влиянии других авторов. Затем идут G.J.Pryde (семь статей) и M.D.Lukin (шесть статей). L.M.Duan, B.P.Lanyon и C.Z.Peng, каждый с пятью статьями, заняли пятое место. После них восемь ученых занимают восьмое место (у них по четыре статьи). Кроме того, J.W.Pan и A.Zeilinger являются лидерами и в рейтинге F/CRP, но в обратном порядке; существуют очевидные различия в рейтингах этих ученых по критериям F/CUP и F/CRP. Сделан вывод, что J.W.Pan и A.Zeilinger обладают наиболее высокими показателями F/CUP и F/CRP, что отражает их решающий вклад в экспериментальное изучение квантовой запутанности.

При использовании индикатора FUP лучшая продуктивность выявлена у J.W.Pan и B.P.Lanyon – у каждого по пять статей. За ними следуют L.M.Duan, A.Vaziri, W.Tittel, J.T.Varreiro, S.L.Braunstein и D.Leibfried, каждый из которых занял третье место с четырьмя статьями. Другие ученые, представившие менее двух статей, имеют рейтинг ниже пятнадцатого, а S.Haroche и F.Sciarrino не имеют статей в FUP. По индикатору CUP, первым и вторым в экспериментальных исследованиях квантовой запутанности являются A.Zeilinger с 16 статьями и J.W.Pan с 13 статьями. Третий и четвертый авторы – G.J.Pryde и M.D.Lukin, у которых соответственно шесть и пять статей. Пять ученых, L.M.Duan, C.Z.Peng, S.Haroche, F.Sciarrino и M.Aspelmeyer, занявшие пятое место, имеют по четыре статьи. Другие опубликовали от одной до трех статей, за исключением W.Tittel, не имеющего публикаций. При комбинации индикаторов FUP и CUP это исследование показало, что большинство ведущих ученых внесли свой вклад в экспериментальные исследования квантовой запутанности в решающей роли разработчика, причем J.W.Pan особенно наглядно продемонстрировал превращение из исполнителя в наставника.

### 3.4. Анализ организаций

Вклад в 400 наиболее цитируемых статей в общей сложности внесли 188 учреждений, представленных первым автором или автором-корреспондентом. В табл.3 приведены 17 ведущих организаций с рейтингом F/CUP не менее семи наиболее цитируемых статей. США с пятью

ведущими учреждениями занимают первое место, за ними следует Австрия с тремя ведущими учреждениями, по два учреждения в Германии и Франции и по одному ведущему учреждению в Великобритании, материковом Китае, Италии, Швейцарии и Австралии (мы используем сокращенные названия учреждений). Среди указанных организаций первое место занимает Univ. Vienna с 33 статьями по F/CUP, за ним следуют Univ. Sci. & Technol. China (25 статей), Univ. Innsbruck (23 статьи) и Austrian Acad. Sci. (22 статьи). Эти четыре учреждения – единственные, чьи первые авторы или авторы-корреспонденты опубликовали более 20 статей. От 10 до 19 статей принадлежат авторам шести организаций: Natl. Inst. Stand. & Technol. (19 статей), Max Planck Inst. (18 статей), Univ. Queensland (14 статей), Univ. Munich (14 статей), Harvard Univ. (10 статей) и Univ. Geneva (10 статей). За ними идут три института: Caltech, CNRS и Ecole Normale Super, занимающие 11-е место (по 9 статей) и Univ. Calif. Los Alamos Natl. Lab., занимающий 12-е место с 8 статьями. Univ. Oxford, Univ. Roma La Sapienza и Yale Univ. занимают 13-е место, (по 7 работ). Более того, Univ. Vienna, Univ. Sci. & Technol. China и Univ. Innsbruck входят в тройку лидеров также по индикатору F/CRP с таким же рейтингом; в ряде случаев есть небольшое различие между рейтингами F/CUP и F/CRP. Стоит отметить, что по оценке методом дробного счета первых авторов/авторов-корреспондентов три первых организации можно считать доминирующими.

В тройку лидеров по показателю FUP входят Univ. Vienna с 32 статьями, Univ. Innsbruck с 23 статьями и Univ. Sci. & Technol. China с 23 статьями. Четвертое место занимают Austrian Acad. Sci. и Max Planck Inst. (по 18 статей). За ними следуют пять институтов с числом статей 10 и более, включая Univ. Queensland (15 статей), Natl. Inst. Stand. & Technol. (14 статей), Univ. Queensland (14 статей), Harvard Univ. (10 статей) и Univ. Geneva (10 статей). По показателю CUP в тройку лидеров входят Univ. Vienna (24 статьи), Austrian Acad. Sci. (21 статья) и Univ. Sci. & Technol. China (20 статей). Они единственные с числом работ не менее 20. У других учреждений число статей первых авторов/авторов-корреспондентов менее 10, за исключением Univ. Innsbruck (19 статей), Natl. Inst. Stand. & Technol. (15 статей), Univ. Queensland (12 статей) и Max

Табл.3. Первые 17 организаций с F/CUP  $\geq 7$ .

Университет	Страна	F/CUP	R	F/CRP	R	FUP	R	CUP	R
Univ. Vienna	Австрия	33	1	27.08	1	32	1	24	1
Univ. Sci. & Technol. China	Материковый Китай	25	2	18.94	2	22	3	20	3
Univ. Innsbruck	Австрия	23	3	17.09	3	23	2	19	4
Austrian Acad. Sci.	Австрия	22	4	10.26	7	18	4	21	2
Natl. Inst. Stand. & Technol.	США	19	5	16.30	4	14	6	15	5
Max Planck Inst.	Германия	18	6	11.78	5	18	4	11	7
Univ. Queensland	Австралия	14	7	11.14	6	15	5	12	6
Univ. Munich	Германия	14	7	8.40	11	14	6	8	9
Harvard Univ.	США	10	9	8.55	9	10	9	9	8
Univ. Geneva	Швейцария	10	9	9.29	8	10	9	3	27
Caltech	США	9	11	8.50	10	9	11	6	13
CNRS	Франция	9	11	3.64	30	8	13	7	10
Ecole Normale Super	Франция	9	11	6.18	13	9	11	7	10
Univ. Calif. Los Alamos Natl. Lab.	США	8	14	7.50	12	7	14	7	10
Univ. Oxford	Соединенное Королевство	7	15	6.00	15	7	14	5	16
Univ. Roma La Sapienza	Италия	7	15	5.58	17	6	17	4	21
Yale Univ.	США	7	15	6.17	14	7	14	5	16

Planck Inst. (11 статей). Хотя рейтинг CUP с методом дробного счета несколько отличается от рейтинга FUP с методом полного счета, можно сделать вывод о том, что Univ. Vienna, Univ. Sci. & Technol. China, Univ. Innsbruck и Austrian Acad. Sci. являются не только основными исполнителями экспериментальных работ по квантовой запутанности, но и играют направляющую роль в этой области.

### 3.5. Анализ по странам

Географически все 400 наиболее цитируемых статей (5% общего количества) распределены между 32 странами, представленными первым автором или автором-корреспондентом. В табл.4 приведены данные по 12 странам с наибольшим количеством цитируемых статей в рейтинге F/CUP. Самый выдающийся результат у США с 102 наиболее цитируемыми статьями, что намного больше, чем у следующих по рейтингу стран, включая Австрию (60 статей), Германию (47 статей), Великобританию (36 статей) и материковый Китай (35 статей). В каждой из этих пяти ведущих стран опубликовано более 30 статей с наибольшей цитируемостью. Шестая страна – это Австралия, выпустившая 23 статьи. Три другие страны, Франция, Швейцария и Италия, занимают седьмое место, по 19 статей от каждой. За ними в рейтинге следуют оставшиеся три страны, включая Японию (17 статей), Данию (11 статей) и Бразилию (10 статей). У семи ведущих стран рейтинг по F/CRP совпадает с рейтингом по F/CUP, причем США (93.21 статьи), Австрия (57.43 статьи), Германия (39,40 статьи), Великобритания (30.97 статьи) и материковый Китай (29.73 статьи) – единственные пять стран, от которых представлено более 20 статей. Таким образом, объединяя два метода счета, мы приходим к выводу, что США, Германия, Австрия, Великобритания и материковый Китай могут считаться доминирующими странами по публикации самых цитируемых статей в данной области.

Более того, настоящее исследование показывает, что при использовании полного счета первых авторов США с 98 статьями также занимают первое место. Следом идет Австрия с 58 статьями, Германия с 47 статьями, Великобритания с 35 статьями и материковый Китай с 33 статьями. Во всех следующих по рейтингу странах опубликовано менее 30 статей, включая Австралию (22 статьи), Италию (19 статей), Францию (18 статей) и другие страны. Согласно полному счету авторов-корреспондентов,

США (80 статей), Австрия (47 статей), Германия (32 статьи), материковый Китай (28 статей) и Великобритания (27 статей) также входят в первую пятерку (но материковый Китай и Великобритания поменялись местами), причем США по-прежнему значительно опережают другие страны. Австралия, представившая 18 статей, занимает шестое место с гораздо меньшим общим количеством статей, чем Великобритания, что указывает на пять ведущих стран, которые публикуют наиболее цитируемые статьи в области эксперимента по квантовой запутанности. Следует отметить, что существует определенное сходство ранжирования по результатам полного счета первых авторов/авторов-корреспондентов, полного счета первых авторов и полного счета авторов-корреспондентов.

### 4. Заключение

В настоящем исследовании для изучения публикации наиболее цитируемых статей в области эксперимента по квантовой запутанности использовались данные, извлеченные из WoSCC. С 1992 г. в общей сложности 400 самых цитируемых статей были написаны 498 первыми авторами или авторами-корреспондентами, представляющими 188 учреждений из 32 стран.

Прежде всего, указанные 400 самых цитируемых статей были классифицированы по годам, причем наибольшее их количество было опубликовано в 2003 г. (35 статей). Распределение цитирований указывает на то, что более ранняя публикация статей дает преимущество в цитировании. Более того, большинство наиболее цитируемых статей было опубликовано всего в девяти научных журналах, причем *Physical Review Letters* – самый продуктивный журнал, за ним следует *Nature*, который имеет самый высокий импакт-фактор. Их суммарный показатель явно превышает другие. Среди семи ведущих журналов шесть являются журналами Nature Index.

В настоящей работе не только используются традиционные методы с полным счетом первых авторов и полным счетом авторов-корреспондентов для ранжирования авторов, учреждений и стран, но также вводится различающий метод с полным счетом первых авторов/авторов-корреспондентов и дробным счетом первых авторов/авторов-корреспондентов для определения доминирующих игроков в области экспериментальных исследований квантовой запутанности. A.Zeilinger и J.W.Pan – ведущие авторы в этой области, причем J.W.Pan за указанный пе-

Табл.4. Первые 12 стран с F/CUP ≥ 10.

Страна	F/CUP	R	F/CRP	R	FUP	R	CUP	R
США	102	1	93.21	1	98	1	80	1
Австрия	60	2	57.43	2	59	2	47	2
Германия	47	3	39.40	3	47	3	32	3
Соединенное Королевство	36	4	30.97	4	35	4	27	5
Материковый Китай	35	5	29.73	5	33	5	28	4
Австралия	23	6	19.47	6	22	6	18	6
Франция	19	7	17.73	7	18	8	16	7
Швейцария	19	7	16.49	9	17	9	9	10
Италия	19	7	17.43	8	19	7	12	8
Япония	17	10	15.94	10	17	9	11	9
Дания	11	11	9.08	12	11	11	8	11
Бразилия	10	12	10.00	11	10	12	7	13

риод превратился из исполнителя в наставника. Видны большие различия во влиянии остальных авторов. По показателю публикации статей в качестве первого автора или автора-корреспондента G.J.Pryde и M.D.Lukin являются также очень влиятельными учеными, за ними следуют L.M.Duan, B.P.Lanyon и C.Z.Peng. Согласно настоящему исследованию, к доминирующим научным учреждениям в области экспериментов по квантовой запутанности относятся Univ. Vienna, Univ. Sci. & Technol. China, Univ. Innsbruck и Austrian Acad. Sci. Эти пять институтов не только являются основными исполнителями, но и определяют стратегию развития данной области. Стоит отметить, что большинство статей первых авторов или авторов-корреспондентов из Китая публикуется только одним учреждением, что демонстрирует централизацию исследований, не наблюдаемую в других ведущих странах. Что касается стран, существует определенное сходство ранжирования по результатам полного счета первых авторов/авторов-корреспондентов, полного счета первых авторов и полного счета авторов-корреспондентов, а показатели США, Германии, Австрии, Великобритании и материкового Китая соответствуют их широкому признанию в данной области, где они играют доминирующую роль. В частности сделан интересный вывод о том, что большинство основных работ в материковом Китае выполняется как одной командой, так и одним учреждением.

Подводя итог, можно сказать, что в настоящем исследовании рассмотрен раздел квантовой информатики и получено общее представление о состоянии экспериментальных исследований квантовой запутанности. Результаты работы предоставляют значимую информацию для исследователей и правительств. Полученные на основе полного счета первых авторов, полного счета авторов-корреспондентов, полного счета первых авторов/авторов-корреспондентов и дробного счета первых авторов/авторов-корреспондентов результаты полезны для определения доминирующих стран, учреждений и авторов. Следует отметить, что наши количественные результаты подтверждают решающий вклад A.Zeilinger и J.W.Pan в экспериментальную физику квантовой запутанности, а также демонстрируют ведущую роль представляемых ими институтов (Univ. Vienna, Univ. Sci. & Technol. China) и стран (Австрия, материковый Китай) в этой области. Таким образом, в настоящей статье получено строгое подтверждение их широкой известности. Наконец, данная работа может помочь последующим ис-

следованиям и правительствам лучше понять тенденции развития экспериментов по квантовой запутанности, чтобы способствовать будущим исследованиям и разработкам в этой области.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (гранты № 71874173 и 71520107002) и Академическим отделом математики и физики Китайской академии наук (грант № 2018-M04-B-004)..

1. Pan J.W., Chen Z.B., Lu C.Y., Weinfurter H., Żeilinger A., Zukowski M. *Rev. Mod. Phys.*, **84**, 777 (2012).
2. Clegg B. New York: St. Martin's Griffin (2006).
3. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. *Phys. Rev.*, **47**, 0777 (1935).
4. Horodecki R., Horodecki P., Horodecki M., Horodecki K. *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 865 (2009).
5. Gibney E. *Nature*, **552**, 320 (2017).
6. Ferreir M.P., Pinto C.F., Serra F.R. *Scientometrics*, **98**, 1899 (2014).
7. Zhang N., Wan S., Wang P., Zhang P., Wu Q. *Scientometrics*, **116**, 1039 (2018).
8. Liao H., Tang M., Li Z., Lev B. *Omega*, **88**, 223 (2018).
9. Ho Y.S. *Chin. J. Chem. Eng.*, **20**, 478 (2012).
10. Fu H.Z., Ho Y.S. *Scientometrics*, **109**, 337 (2016).
11. Ho Y.S., Hartley J. *Scientometrics*, **110**, 1065 (2017).
12. Rinia E.J., Van Leeuwen T.N., Van Vuren H.G., Van Raan A.F.J. *Res. Policy*, **30**, 357 (2001).
13. Matthews A.P. *Scientometrics*, **95**, 69 (2013).
14. Takeda Y., Kajikawa Y. *Scientometrics*, **78**, 543 (2009).
15. Davarpanah, M.R. *J. Sch. Publ.*, **43**, 421 (2012).
16. Jiang M., Qi Y., Liu H., Chen, Y. *Nanoscale Res. Lett.*, **13**, 1 (2018).
17. Munoz-Sandoval E.J. *Nanopart. Res.*, **16**, 1 (2014).
18. Baldock C.J. *Phys. Conf. Ser.*, **777**, 012030 (2017).
19. Olijnyk N.V. *PLoS One*, **13**, e0190646 (2018).
20. Strumia A., Torre R. *J. Informetr.*, **13**, 515 (2019).
21. Moldwin M.B., Liemohn M.W. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **123**, 2557 (2018).
22. Waltman L. *J. Informetr.*, **6**, 700 (2012).
23. Ho Y.S. *Scientometrics*, **94**, 1297 (2013).
24. Costas R., Bordons M. *Scientometrics*, **88**, 145 (2011).
25. Ho Y.S., Kahn M. *J. Assoc. Inf. Sci. Tech.*, **65**, 372 (2014).
26. Waltman L., van Eck N.J. *J. Informetr.*, **9**, 872 (2015).
27. Ho Y.S. *Scientometrics*, **98**, 137 (2014).
28. Fu H.Z., Ho Y.S. *Curr. Sci.*, **115**, 410 (2018).
29. Pritchard A. *J. Doc.*, **25**, 348 (1969).
30. Ellegaard O. *Scientometrics*, **116**, 181 (2018).
31. Chen H., Ho Y.S. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **49**, 12 (2015).
32. Zukowski M., Zeilinger A., Horne M.A., Ekert A.K. *Phys. Rev. Lett.*, **71**, 4287 (1993).
33. Pittman T.B., Shih Y.H., Strekalov D.V., Sergienko A.V. *Phys. Rev. A*, **52**, R3429 (1995).
34. Bouwmeester D., Pan J.W., Mattle K., Eibl M., Weinfurter H., Zeilinger A. *Nature*, **390**, 6660 575 (1997).
35. Ma J., Fu H.Z., Ho Y.S. *Environ. Earth Sci.*, **70**, 1039 (2013).
36. Mo Z., Fu H.Z., Ho Y.S. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **25**, 15541 (2018).