

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

**Гравитационные волны**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 431 группы

направления 03.03.03 «Радиофизика»

---

факультета нелинейных процессов

---

Демина Дмитрия Андреевича

---

Научный руководитель

доцент, к. ф.-м.н.

С.А. Куркин

Зав. кафедрой:

профессор, д.ф.-м.н.

А.А. Короновский

Саратов 2017 г.

## 1. Введение

Изучение гравитационных волн – это одно из самых интересных и перспективных направлений в области астрофизики. Оно зародилось еще в начале XX века, сразу после предсказания существования гравитационных волн знаменитым немецким ученым Альбертом Эйнштейном, следовавшего из общей теории относительности.

Спустя около 100 лет технологические разработки позволили зарегистрировать очень слабое по своей природе гравитационное возмущение. Дальнейшее изучение гравитационных волн позволит открыть совершенно новые области гравитационно-волновой астрономии. Возможно, за этим последует революция в наших познаниях о Вселенной, позволяя на более качественном уровне изучать космическое пространство: черные дыры, нейтронные звезды, рождения сверхновых звезд, и многое другое. Важно отметить, что в настоящее время область посвященная изучению гравитационных волн стремительно развивается, и не в последнюю очередь благодаря серии удачных наблюдений в обсерватории LIGO.

Задачей данного аналитического обзора является объединение событий, сыгравших ключевую роль в изучении гравитационных волн, вслед за которыми последовало их фактическое обнаружение. А также их подробный разбор и анализ.

Бакалаврская работа состоит из введения, исторической части, краткого обзора ключевых событий предшествующих успешной регистрации гравитационных волн, главы посвященной подробному изучению устройства лазерного интерферометра LIGO. А также в работе есть главы посвященные изучению тепловых и нетепловых шумов присутствующих в детекторе, и непосредственно о самом обнаружении гравитационных волн, заключения, и списка литературы включающего 26 источников. Общий объем бакалаврской работы – 41 страница, включая 11 рисунков.

## Краткое содержание работы

В первой главе, во введении сформулирована актуальность темы и поставлена основная задача данного аналитического обзора.

Глава вторая – обширный раздел, который содержит историческую справку и имеет деления на подпункты, в которых рассматривается специальная и общая теория относительности, включая некоторые вытекающие следствия. Подробно излагается теоретическая основа, включая рассмотрение подробных примеров. В заключении раздела по специальной теории относительности, рассмотрены следствия, такие как: относительность одновременности, относительность пространственных расстояний, относительность промежутков времени. В разделе, посвященном общей теории относительности был рассмотрен, так называемый парадокс Эренфеста: теоретический эксперимент, который сыграл ключевую роль в развитии общей теории относительности.

Глава третья посвящена важным событиям, которые произошли за период от создания общей теории относительности до создания лазерных гравитационно-волновых детекторов LIGO.

Раздел начинается с рассмотрения первых экспериментальных подтверждений общей теории относительности, таких как: смещение перигелия орбиты Меркурия, искривление хода светового луча в поле тяготения.

Астрономические наблюдения показали, что перигелий (точка максимального сближения тел) орбиты Меркурия поворачивается в течение 100 лет на определенное количество угловых секунд. Однако некоторая часть смещения орбиты долгие годы не поддавалась объяснению.

Произведенные вычисления на основе теории тяготения Ньютона, показывают, что суммарное влияние всех других известных планет, должно приводить к смещению перигелия орбиты Меркурия на 527'' за сто лет. Астрономические наблюдения, которые провел французский ученый Урбен

Жан Жозеф Леверье еще в XIX веке, показали, что орбита Меркурия смещается на 565”.

И только с выходом общей теории относительности удалось объяснить недостающие 38”. Недостающая поправка объясняется тем, что орбита Меркурия находится гораздо ближе к солнцу, чем другие планеты солнечной системы. Из этого следует, что движение происходит в гораздо более сильном гравитационном поле.

В опубликованной статье «О влиянии силы тяжести на распространение света» в 1911 г. Альберт Эйнштейн рассмотрел вопрос об искривлении лучей света под действием поля тяготения. Согласно его предположению лучи света должны отклоняться от своего прямолинейного движения около Солнца.

По расчетам Эйнштейна смещение луча света должно составлять:

$$\delta = 1,75''$$

На момент эксперимента 1922 года, угол отклонения составил [1]:

$$\delta = 1,78'' \pm 0,17$$

Что согласуется с теоретическим расчетом, полученным на основе общей теории относительности.

Во второй половине раздела отмечен факт создания первого квантового генератора. Это важно т.к. в дальнейшем лазеры стали применять в качестве основного элемента гравитационно-волнового детектора. И в заключении был рассмотрен первый детектор гравитационных волн, спроектированный американским ученым Джозефом Вебером во второй половине 1960-х годов.

Четвертая глава начинается с описания детектора LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Это крупнейший из существующих детекторов на момент написания работы.

Большая часть раздела посвящена описанию установки и рассмотрению принципа действия детектора.

Детектор LIGO работает в режиме так называемого «темного порта». Это режим, при котором на фотодетектор не попадает лазерного излучения. Работа в таком режиме достигается путем подбора разности плеч интерферометра, таким образом, чтобы пик одной волны совпадал с пиком другой волны. В результате такой деструктивной интерференции, волны полностью компенсируют друг друга. В режиме «темного порта» на выходе из плеч интерферометра, все излучение направляется в сторону источника, но на пути следования установлено зеркало рециркуляции мощности, которое при правильном балансе потерь интерферометра и пропускании рефлектора, большую долю излучения направляет назад в плечи интерферометра. Такой порядок позволяет значительно увеличить накачку в плечах детектора.

По существу, в интерферометре при прохождении гравитационной волны, измеряют величину изменения положения тестовых масс:

$$X = \frac{x_1 - x_2}{2} ,$$

где  $(x_1)$  и  $(x_2)$  - координаты тестовых масс в одном и в другом плече интерферометра. В том случае, если  $x_1 = x_2$ , то все излучение посылается обратно к источнику. Когда  $x_1 \neq x_2$ , доля излучения отделяется, и таким образом попадает на фотодетектор, где и происходит регистрация.

Стоит отметить, что высокая мощность в плечах интерферометра играет важную роль. Она нужна для того, чтобы уменьшить так называемый дробовой шум. Для этого, в интерферометре установлены дополнительные зеркала рециркуляции, направляющие свет, выходящий из интерферометра обратно.

В данном разделе также приведена статистика, показывающая, как изменялась чувствительность детектора за период с 2002 по 2010 г. Чувствительность антенны в 2002 году составляла  $h \sim 10^{-19}$  Гц, в 2005 году

$h \sim 10^{-22}$  Гц. А уже в 2010 году на обновленной антенне Initial LIGO чувствительность была порядка  $h \sim 1,5 \cdot 10^{-22}$  Гц. Роста чувствительности добиваются, в большей степени, за счет уменьшения влияния тепловых и нетепловых шумов в детекторе, обзор которых приведен в следующей главе.

В пятой главе уделено особое внимание шумам, которые вносят основной вклад в ограничение чувствительности антенны. Классифицировать помехи, можно по двум группам: это шумы теплового и нетеплового характера. К первым можно отнести нагрев пробных масс из-за поглощения лазерного излучения, и температурные колебания подвесов. Ко второй группе можно определить флуктуации частоты и фазы лазерного излучения, шумы низкой частоты сейсмического происхождения, акустические шумы, возникающие в подвесах, а так же шумы пробных масс, вызванные скапливанием зарядов на внешней части зеркал и многие другие.

Подвесы в детекторе представляют собой систему из четырех зеркал расположенных в конце каждого из плеч интерферометра. Две верхних массы изготавливаются из стали, а нижние выполнены из плавленого кремнезёма (соединение кремния с кислородом). Размеры зеркал следующие: диаметр 34 см, толщина 20 см, масса 40 кг. Каждое зеркало покрывается высокоотражающим покрытием, так пишет В.Б.Брагинский и М.В.Сажин в обзоре «Гравитационные волны»: «из 106 фотонов, падающих на зеркало, “гибнет” (превращается в тепловые фотоны) один, а остальные отражаются» [2]. Кроме этого защитный слой на зеркалах, минимизирует расширения и сужения пробных масс, которые имеют место даже при очень малом поглощении излучения. Но какой-то нагрев все же происходит, и для того чтобы создать равномерное распределение температуры по всему зеркалу, было принято решение использовать вспомогательную систему. С помощью газового лазера ( $\text{CO}_2$ ) осуществляется дополнительный нагрев зеркал так, чтобы температура по всему зеркалу была в целом одинакова.

Высокие требования предъявляются к основному элементу гравитационной антенны, т.е. к подвесам зеркал. Их следует производить не из стали, как это было сделано в первом поколении антенны, а из плавленого кварца. Такая необходимость продиктована исследованиями, проведенными в данной области, которые показали, что в нитях, выполненных из стали присутствуют побочные шумы «потрескивания», существование которых объясняется высоким уровнем запасенной упругой энергии. У подвесов, изготовленных из плавленого кварца, такой особенности выявлено не было [3].

Система сейсмической изоляции представляет собой достаточно сложный элемент гравитационного детектора. Весь узел в целом, делят на систему активной и пассивной виброизоляции. Система сейсмической изоляции помещается в так называемый «танк», внутри которого, так же как и в тоннелях интерферометра, поддерживается высокая степень вакуума.

Активная система сейсмической изоляции включает в себя множество датчиков настроенных на разные частоты окружающей среды, распознающих посторонние вибрации. Сигнал с датчиков поступает в вычислительный центр, откуда после обработки посылается обратный сигнал на подвижную платформу, которая в свою очередь совершает встречное движение. Таким образом, подавляется большая часть шума.

Система пассивного демпфирования дополняет активную изоляцию. В этой роли выступает система подвески зеркал. Она защищает тестовые массы от воздействия сейсмических шумов для всех степеней свободы зеркал. В частности, так называемая реакционная масса, поглощает любое движение, частично отфильтрованное активной системой изоляции. А так же, стоит учитывать вес компонентов подвески, большой вес узла помогает предотвратить движение зеркал, благодаря закону инерции.

В завершении данного раздела была рассмотрена идея использования сжатого света в детекторах.

Дробовой шум является главным источником шума в оптической системе интерферометра. Уменьшить влияние, которого можно за счет увеличения мощности накачки в плечах интерферометра. Но есть и альтернативный способ, который заключается в использовании технологии сжатого света.

Впервые технология сжатия света была продемонстрирована в 1985 году. Тогда удалось снизить уровень шума на величину менее 1 (ДБ) на частотах выше 400 (МГц) [4]. Современные технологии на основе вырожденных оптических параметрических генераторов, позволяют снизить уровень шума более чем на 3 (ДБ), при тех же оптических мощностях [5].

Подобная система в 2011 году была опробована на детекторе GEO 600. Тогда удалось снизить влияние дробового шума на величину порядка 3 (ДБ). На детекторах LIGO технология сжатого света еще не используется. Но возможно, что в ближайшее время на обновленной ступени Advanced LIGO технология будет внедрена.

В шестой главе были проанализированы результаты серии успешных регистраций гравитационных волн при помощи детекторов LIGO.

Первая успешная регистрация гравитационных волн состоялась 14 сентября 2015 года. Сигнал был получен с задержкой в 6,9 миллисекунд вначале на интерферометре LIGO в Ливингстоне, а после на детекторе LIGO в Хэнфорде.

Полученные результаты изображены на рисунке 1.

На верхней части графика изображены зафиксированные сигналы в двух обсерваториях. Для визуального сравнения они были наложены друг на друга, с учетом временного расхождения.



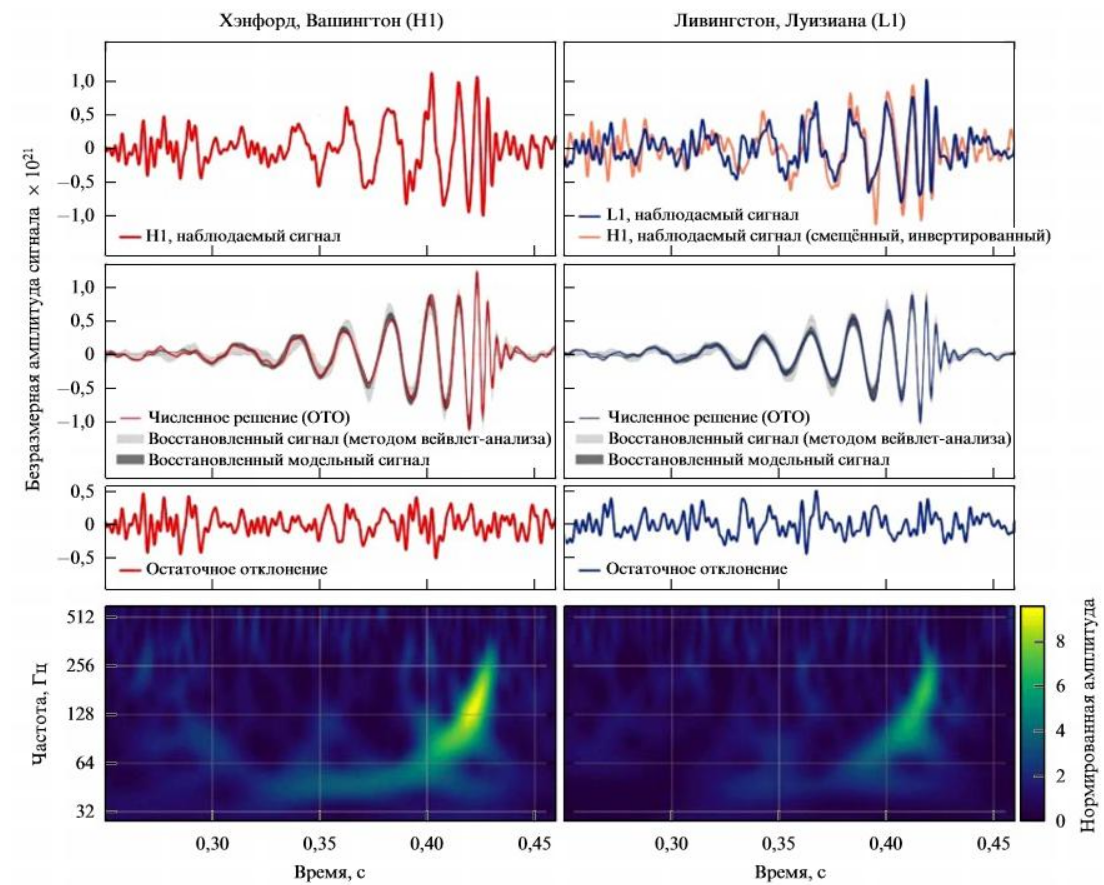


Рис.1. Сигнал GW150914, полученный с двух детекторов LIGO [6].

Результаты из разных обсерваторий абсолютно идентичны, если сделать поправку на 6,9 миллисекунд, возникающую из-за разницы в расположении обсерваторий. Видно, что графики качественно совпадают. Частота сигнала изменяется за 0,2 секунды в пределах от 35 Гц и достигает максимума на отметке в 250 Гц. При этом можно заключить, что характер изменения частоты, носит линейный характер. На графике видно, что вначале сигнал слабо проступает на фоне остаточных шумов, после начинает проявляться сигнал почти периодический, и происходит нарастание по амплитуде и частоте. Момент увеличения амплитуды и изменения частоты соответствует гравитационной волне.

Чуть ниже продемонстрированы сглаженные графики, полученные путем математического моделирования. Красным и синим цветом показано численное решение на основе общей теории относительности. Видно, что график

полученный на основе ОТО хорошо гармонирует с профилем зарегистрированной волны. Темно-серая линия соответствует шаблону слияния двух черных дыр, а светло-серая моделирует сигнал полученный методом вейвлет-анализа. Третий ряд демонстрирует остаточный сигнал, полученный путем вычитания отфильтрованного и экспериментально полученного сигналов.

Нижние графики, есть результат частотного анализа, на них отображена частотно-временная зависимость. В обоих случаях наблюдается рост частоты со временем. Цвет изображения характеризует интенсивность колебаний. Так преобладающий синий цвет соответствует шуму, зеленый цвет принадлежит гравитационной волне малой интенсивности, а желтый характерен максимальным возмущениям гравитационной волны.

В том же 2015 году, 26 декабря, состоялось успешное детектирование второго события. Сигнал, полученный с двух детекторов LIGO, представлен на рисунке 2.

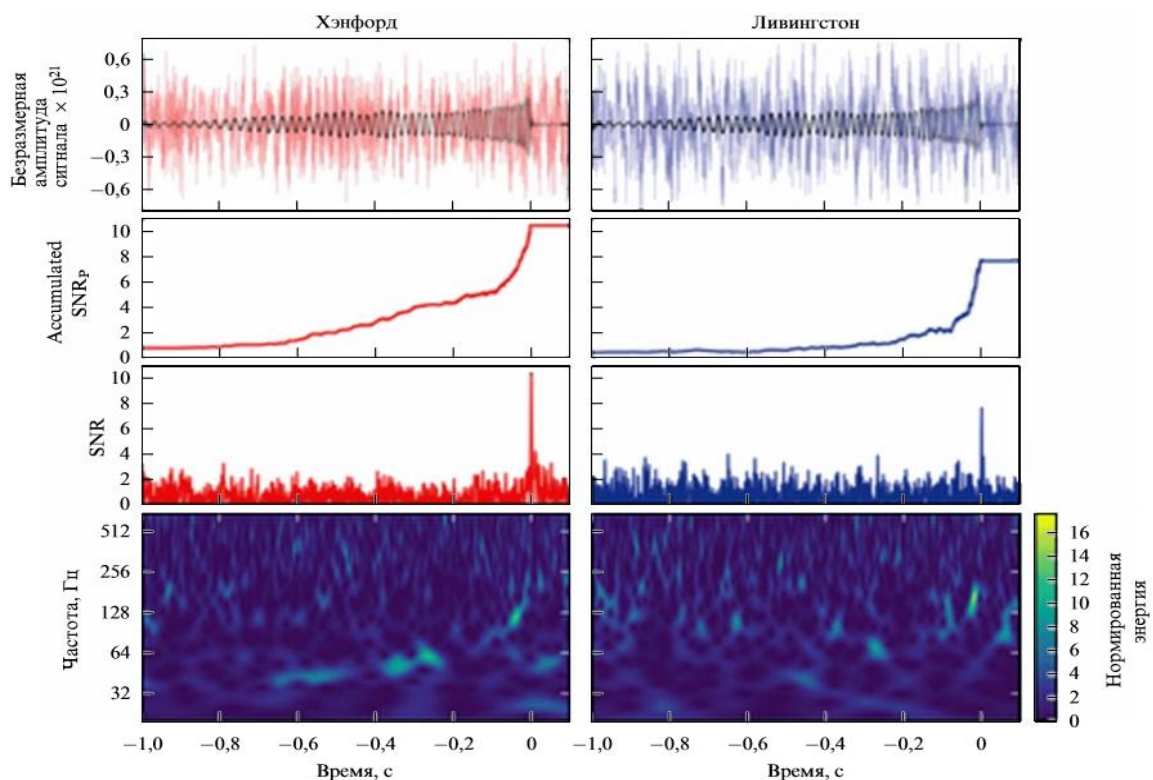


Рис.2. Сигнал второго детектирования, GW151226 [7].

Для подавления больших флуктуаций, зарегистрированный сигнал был отфильтрован в диапазоне от 30 до 600 Гц, который и представлен на верхнем графике. Из графиков видно что, как и в первом случае, частота сигнала линейно нарастает. Но длительность сигнала во втором случае гораздо больше, она составила 1 секунду. На протяжении 55 циклов, частота сигнала изменилась от 35 Гц., и достигла максимума на отметке 450 Гц. Во втором случае сигнал прослеживается гораздо хуже, что связано с гораздо более слабым гравитационным излучением.

На графике  $SNR_p$  отображено интегрально пиковое отношение сигнала к мощности присутствующего шума. Чем больше отношение  $SNR$ , тем будет менее заметен шум, а значит выше вероятность обнаружения истинного сигнала.

Из графиков видно, что отношение сигнал/шум большую часть времени не превышает отметки 3-4. Но когда зарегистрированный и ожидаемый сигнал наилучшим образом совпадают, отношение  $SNR$  резко увеличивается. Что на графике проявляется как резкий пик. Пиковое значение  $SNR$  в LIGO в Хэнфорде на уровне (10,5), а в LIGO в Ливингстоне на отметке (7,9). Такое различие объясняется разницей в уровне чувствительности детекторов.

На графике частотно временной зависимости, так же как и в первом случае, наблюдается рост частоты с течение времени. В отличие от зарегистрированного сигнала 14 сентября 2015 года, сигнал слабо проступает на фоне шумов. Но частотно-временное представление наиболее отчетливо заметно в сигнале, полученном с обсерватории LIGO в Хэнфорде, где отношение сигнал/шум больше.

В заключении данного раздела, можно отметить следующее:

Первое событие регистрации гравитационных волн, ознаменовало собой экспериментальное подтверждение существования гравитационных волн.

В свою очередь второе и последующие наблюдения выделяют другую мысль. Как видно за первой успешной регистрацией гравитационных волн, последовала вторая, и совсем недавно третья регистрация (GW170104) состоявшаяся 4 января 2017 г. О которой стало известно только 1 июня 2017 г. Ряд успешных регистраций, в первую очередь говорит о появлении нового направления, направления гравитационно-волновой астрономии. Теперь больше нет необходимости доказывать существование гравитационных волн. Но есть цель, изучать на более качественном уровне эволюцию звезд, скоплений, черных дыр и мн.др. Для достижения которой нужны новые успешные наблюдения.

## Заключение

Открытие гравитационных волн после многолетних исканий – это только начало нового направления в физике. Несомненно, сам факт регистрации очень важен. Это не только подтверждение существования черных дыр, но и прямое доказательство существования гравитационных волн. А значит с уверенностью можно сказать, что общая теория относительности с первым экспериментальным обнаружением гравитационных волн подтверждена на практике. Профиль зарегистрированных волн очень хорошо гармонирует с результатами, полученными на основе общей теории относительности.

Для физиков экспериментаторов не менее важно, что гравитационно-волновая астрономия отныне является новым каналом, по которому становится возможным, исследовать ранее недоступные области.

Важно подчеркнуть, что изучение гравитационных сигналов – это способ познавать природу источников этих волн, так как профиль волны содержит в себе всю информацию о сущности происхождения.

В обзоре также было уделено немало внимания исторической части, без которой была бы нарушена целостность всей работы. Подробно изучен детектор гравитационных волн. Рассмотрен принцип действия, а также разобраны основные недостатки гравитационного детектора, ослабляющие чувствительность антенны. При этом было проанализировано большое количество источников как зарубежных, так и отечественных авторов.

В заключении можно отметить, что в настоящее время еще не достигнута предельная чувствительность детектора в силу того, что на данный момент многие шумы достаточно не изучены, и не отработана технология их подавления. Но чувствительность антенны стремительно растет. Благодаря этому в ближайшее время станет возможным изучение гравитации на новом более качественном уровне.

## Список использованной литературы

- [1] Франкфурт У.И. Специальная и общая теория относительности (исторические очерки): издательство «Наука» г. Москва. 1968 г.
- [2] Брагинский В.Б., Сажин М.В. Гравитационные волны: 2003 г.
- [3] Биленко И.А. Тепловые и избыточные механические шумы в экспериментах с пробными телами: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва. 2008 г.
- [4] Slusher R.E. et al. Observation of Squeezed States Generated by Four-Wave Mixing in an Optical Cavity: Physical Review Letters. 25 November 1985.
- [5] Халили Ф.Я. Квантовые измерения в детекторах гравитационных волн: Успехи физических наук, том 186, №10. Октябрь 2016 г.
- [6] Abbott.B.Petal. (LIGO Scientific Collaboration and VIRGO Collaboration) Physical Review Letters 116, 061102 (2016)
- [7] Abbott.B.Petal. (LIGO Scientific Collaboration and VIRGO Collaboration) Physical Review Letters 116, 241103 (2016)