

Аннотация цикла работ, выдвигаемого  
на премию им. М.В. Ломоносова за научную деятельность 2016 г.

## **Дорога к открытию гравитационных волн**

С.П. Вятчанин, В.П. Митрофанов и Ф.Я. Халили

В сентябре 2015 года двумя интерферометрами LIGO (Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory) был впервые зарегистрирован гравитационно-волновой сигнал от слияния двух черных дыр. Этому событию предшествовали несколько десятков лет напряженной работы ученых все мира по разработке и повышению чувствительности детекторов гравитационных волн. Научные исследования, связанные с проектом LIGO, выполнялись (и выполняются) в рамках международной организации LSC (LIGO Scientific Collaboration), которая в настоящий момент объединяет более тысячи ученых из 15 стран, в том числе группу МГУ, включающую авторов этой статьи.

Наша группа была создана В.Б. Брагинским, который вплоть до своей кончины в марте 2016 года был ее руководителем. В проекте LIGO она участвует с момента его основания в 1992 году. За это время в группе выполнены уникальные экспериментальные и теоретические исследования, объединенные общей тематикой повышения чувствительности в высокоточных измерениях, и в частности, в детекторах гравитационных волн.

В силу чрезвычайной слабости взаимодействия гравитационного поля с веществом, для регистрации гравитационных волн необходимо измерять очень малые смещения пробных зеркал интерферометров, порядка  $10^{-18}$  метров. Это требует высокой степени подавления тепловых шумов подвесов этих масс, то есть, в силу флуктуационно-диссипационной теоремы, высоких значений их добротностей. В нашей группе были выполнены уникальные исследования механических потерь в резонаторах из плавленого кварца, сапфира и кремния в широком диапазоне температур и были разработаны методы достижения максимальной добротности в механических колебательных системах. В частности, был создан маятник из плавленого кварца, на котором было достигнуто рекордное время релаксации механических колебаний, превышающее 5 лет. Этот маятник стал прототипом монолитных кварцевых подвесов, используемых в настоящее время детекторами LIGO.

Чувствительность лазерных интерферометров ограничивается также случайными колебаниями поверхностей зеркал, создаваемыми различными физическими механизмами. В группе были проведены теоретические исследования ряда таких механизмов. В частности, впервые было указано на решающую роль термоупругих и терморелактивных шумов, источником которых являются термодинамические флуктуации температуры. Выявленный недопустимо высокий уровень термоупругих шумов в сапфире послужил причиной отказа от первоначального плана по использованию зеркал из этого материала в детекторах LIGO второго (текущего) поколения в пользу зеркал из плавленого кварца.

Еще одним источником флуктуационных сил, действующих на зеркала, являются заряды, всегда присутствующие на кварцевых пробных массах и взаимодействующие с окружающими

объектами и электрическими полями. Были выполнены исследования накопления и миграции электрических зарядов на поверхности плавленого кварца, позволившие оптимизировать работу электростатических актюаторов, используемых для позиционирования пробных зеркал.

Рекордная точность измерения смещений в лазерных детекторах гравитационных волн, в соответствии с пределом дробового шума, требует использования очень высокой оптической мощности. В цикле научных наблюдений O1 в 2015 году, когда зарегистрированы гравитационные волны, циркулирующая мощность в интерферометрах LIGO составляла 100 кВт; в будущем она должна быть повышена до 0.8 МВт. Такая мощность может приводить к различным нежелательным к нелинейным эффектам, в частности к параметрическому возбуждению, приводящему к перекачке энергии из основной оптической моды в паразитную стоксову моду и моду упругих колебаний зеркал. Этот эффект был предсказан нами в 2000 г., также были предложены методы его подавления. Следует отметить, что в 2015 году этот эффект уже наблюдался в интерферометрах LIGO.

Наиболее фундаментальным механизмом, ограничивающим чувствительность лазерных гравитационных детекторов, являются квантовые флуктуации света вы них. После повышения оптической мощности в интерферометрах LIGO до проектной (0.8 МВт.) их чувствительность достигнет т. н. стандартного квантового предела, являющегося следствием соотношения неопределенности Гейзенберга и предсказанного В.Б. Брагинским в 1968 г. Последующее повышение чувствительности детекторов гравитационных волн, необходимое для их превращения в регулярный источник астрофизической информации, потребует преодоления этого предела. Наша группа занимается проблемами квантовых измерений, в том числе разработкой методов преодоления СКП, с середины 70-х годов. Сейчас она является признанным в мире авторитетом в этой области. Применительно к лазерным детекторам гравитационных волн, в нашей группе были разработаны, в частности, две схемы, которые сейчас рассматриваются как основные кандидаты на реализацию в детекторах гравитационных волн следующего поколения, а именно, схемы квантового вариационного измерения и квантового измерителя скорости.

По тематике лазерных гравитационных антенн за последние 10 лет каждым из членов группы опубликовано более 100 статей в реферируемых научных журналах, средний индекс Хирша членов группы – 43 (по данным Web of Science).

С.П. Вятчанин

В.П. Митрофанов

Ф.Я. Халили