

**Прецизионная Лазерная Метрология для Ускорителей
и Детекторных Комплексов**

Продление проекта на 2022-2023 гг.

Шифр темы: 02-0-1127-2016/2023

Лаборатория ЛЯП

Направление:

Физика и техника ускорителей

Наименование темы: Исследования в области e^+/e^- линейных ускорителей и коллайдеров нового поколения для фундаментальных и прикладных целей.

ОИЯИ

ЛЯП

Н.В. Атанов, О.С. Атанова, В.Ю. Батусов, Ю.А. Будагов, И.В. Бедняков, В.В. Глаголев, Д.Л. Дёмин, Ю.В. Клемешов, А. В. Краснопёров, С.М. Коломоец, А.М. Кузькин, М.В. Ляблин, А.А. Плужников, Р.В. Ни, А.А. Селецкий, С.Н. Студенов, Г. Торосян, Г.В. Трубников, Г.Д. Ширков

ЛСВЭ

А.В. Бутенко, С.А. Костромин, Топилин Н.Д.

ЛИТ

Г.А. Ососков

ЛТФ

Д.И. Казаков, А. Н. Баушев

ДЕЗИ

(Гамбург) Й. Мних, Н. Валкер

ЦЕРН,

(Женева, Швейцария) О. Брюнинг, Б. Ди Джироламо+7, Ж.-Кр. Гайде, Х. Манно Дюран+2, Д. Мергенкюль,

ИНФН

(ИНФН Пиза) Джовани Ласурдо, Ф. Бедески

(Рим Италия Университет) Фулвио Ричи

Армения

ОМТН НАН РА Л. А.. Аголюян, Ширак техноложди А. Есяян, И-т сейсмологии НАН РА Д. Карапетян

Узбекистан

АнРУз Б.С. Юлдашев, Институт сейсмологии АнРУз В.А Рафиков, А.Х. Ибрагимов, Самаркандский гос. универ. Л.А.Хамидов, Сафаров А.Н. У. Тухтаев +2

Грузия

ИФВЭ и К Д.И. Хубуа

Белоруссия

И-т Физики НАН Белоруссии, Минск,

М.А. Батурицкий, Ю.А Курочкин +3, Ю.П. Выблый, С.Я. Килин

Руководитель проекта Ю.А. Будагов

Заместитель руководителя проекта М.В. Ляблин

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА
**ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ МЕТРОЛОГИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ
И ДЕТЕКТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ _____ /___/ 2021 г.

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ _____ /___/ 2021 г.

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ _____ /___/ 2021 г.

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ОИЯИ _____ /___/ 2021 г.

НАЧАЛЬНИК НОО _____ /___/ 2021г.

ДИРЕКТОР ЛЯП _____ /___/ 2021 г.

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛЯП _____ /___/ 2021г.

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА _____ /___/ 2021 г.

ЗАМ. РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА _____ /___/ 2021 г.

ОДОБРЕН

ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ _____ /___/ 2021 г.

**Предлагаемый план график и необходимые ресурсы
для осуществления Проекта
ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ МЕТРОЛОГИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ
И ДЕТЕКТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Наименование узлов и систем установки, работ, ресурсов, источников финансирования		Стоимость узлов установки. (тыс. долл.)	Предложения лабораторий по распределению финансирования и ресурсов		
			1год 2022	2год 2023	
Основные узлы и оборудование	1 Малогабаритный Прецизионный Лазерный Инклинометр	132	66	66	
	2 Лазерная Реперная Линия	20	12	8	
	3.Интерфером. Измеритель Длины	20	8	12	
	4.Сейсмоизолированная платформа	20	10	10	
Необходимые ресурсы	Нормо-часы	ОП ОИЯИ механические работы электроника КБ ООЭП ЛЯП	800 (часы)	400 (часы)	400 (часы)
		ускоритель (тип) реактор ЭВМ (тип)			
		Эксплуатационные расходы			
Источники финансирования	Бюджетные	Затраты из бюджета, в том числе финансирование от ВМБФ и Армении	192	96	96
	Внебюджетные	Договоры: Гранты:			

Смета затрат по Проекту

**ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ МЕТРОЛОГИЯ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ
И ДЕТЕКТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

№Пп	Наименование статей затрат	Полная стоимость	1год 2022	2год 2023	
	Прямые расходы на Проект				
1	Компьютерная связь				
2	КБ				
3	ООЭП (в нормо-часах)	800	400	400	
4	Материалы	10	5	5	
5	Оборудование	92	46	46	
6	Оплата НИР, выполняемых по договорам	30	15	15	
7	Командировочные расходы, в т.ч.	60	30	30	
	а) в страны нерублевой зоны	54	27	27	
	б) в страны рублевой зоны	6	3	3	
	в) по протоколам				
	Итого по прямым расходам:	192	96	96	
	В том числе: из бюджета ЛЯП	160	80	80	
	Бюджетные от ВМВФ и от полномочного Армении в ОИЯИ	32	16	16	

Руководитель Проекта

Ю.А. Будагов

Заместитель руководителя Проекта

М.В. Ляблин

Директор ЛЯП

В.А. Бедняков

Ведущий инженер-экономист ЛЯП

Аннотация

Представлены основные достижения проекта «Прецизионная Лазерная Метрология для Ускорителей и Детекторных Комплексов» за 2019-2021гг. Показано, что с каждым годом нарастает применение разработок проекта.

Во втором продлении Проекта будет создан инновационный малогабаритный монолитный¹ Прецизионный Лазерный Инклинометр с характеристиками, достаточными для его применения в Интерферометрических Гравитационных Антеннах (VIRGO, возможно - Telescope Einstein), в создании системы угловой сейсмоизоляции коллайдеров НИКА, ЛНС и – перспективно – FCC, для создания сети ПЛИ в Армении и Узбекистане с целью прогноза землетрясений.

Активно развиваемый метрологический инструментарий - Лазерная Реперная Линия, Интерферометрический измеритель длины и Сейсмоизолированная платформа - во втором продлении Проекта выходит на экспериментальное тестирование.

Введение

Современная метрология формирует новый подход к проведению крупномасштабных физических экспериментов при помощи метрологических инструментов возможна не только более точная настройка физической установки, но и её пространственная стабилизация от внешних воздействий во время эксперимента. Это позволяет достичь значительного уменьшения шумов при проведении экспериментов.

Проект «Прецизионная Лазерная Метрология для Ускорителей и Детекторных Комплексов» направлен именно на создание необходимого метрологического инструментария для проведения экспериментов в сейсмоизолированных от угловых колебаний поверхности Земли условиях. В Проекте предусматривается создание Прецизионного Лазерного Инклинометра (ПЛИ), Лазерной Реперной Линии (ЛРЛ), Интерферометрического Измерителя Длины (ИИД) и Сейсмоизолированной от угловых колебаний поверхности Земли Исследовательской Платформы (СИД).

Из перечисленных метрологических инструментов следует выделить Прецизионный Лазерный Инклинометр [1-20]. В последние два продления проекта мы создавали всё более совершенные его образцы.

¹ Элементы инклинометра не перемещаются друг относительно друга

Используя то, что вертикаль силы тяжести является одним из наиболее стабильных реперов в природе (точность $\sim 10^{-10}$ рад за год) мы при помощи ПЛИ можем связать координаты контролируемых точек и определить их взаимное перемещение. Это позволяет измерить движение поверхности Земли и тем самым определить деформацию крупномасштабных физических установок.

Результатом Проекта является достижение достаточной чувствительности для такого контроля: Прецизионный Лазерный Инклинометр будет обладать точностью измерения порядка 10^{-9} радиан в режиме онлайн, Лазерная Реперная Линия должна иметь точность измерения порядка нескольких микрон на расстоянии 130м, Интерферометрический Измеритель Длины должен измерять расстояние 16 м с точностью порядка 10 микрон и Сейсмизолированная Исследовательская Платформа должна горизонтализоваться с точностью порядка 10^{-8} Рад.

Работы по Лазерной метрологии защищены четырьмя государственными патентами РФ [17,18,25,27].

Итоги работы по проекту за 3-х летний период

1. Создание Метрологической Лаборатории (МЛ) ЛЯП

Одним из самых важных достижений метрологической группы за период двух продлений проекта явилось создание Метрологической Лаборатории ЛЯП.

В Метрологической Лаборатории обеспечиваются условия для проведения всех экспериментов, которые в данный момент планируются в рамках продлеваемого Проекта.

Метрологическая лаборатория представляет собой температурное стабилизированное помещение длиной 24м и шириной 6 м (Рис.1).



Рис.1 Метрологической Лаборатории ЛЯП ОИЯИ

Профессиональный прецизионный кондиционер стабилизирует температуру внутри помещения с точностью $\pm 1^0\text{C}$. В Лаборатории размещены пять оптических столов, она оснащена базовым оптическим оборудованием, созданы условия для проведения экспериментов в рамках продлеваемого Проекта.

Эти работы не были предусмотрены в планах предыдущего продления и явились для Метрологической группы перевыполнением заданий ПТП и Проекта.

2. Создание сети из четырёх ПЛИ в ЦЕРН (Соглашение ЦЕРН-ОИЯИ²).

Сеть из четырёх ПЛИ предназначена для измерения деформации пола Тоннеля Большого Адронного Коллайдера. Все четыре ПЛИ (1,2,3,4) прошли апробацию (Рис.2) в Транспортном Тоннеле №1 ЛНС, и весной 2021 года они будут размещены в туннеле ЛНС.

² Второе Соглашение находится в процессе оформления

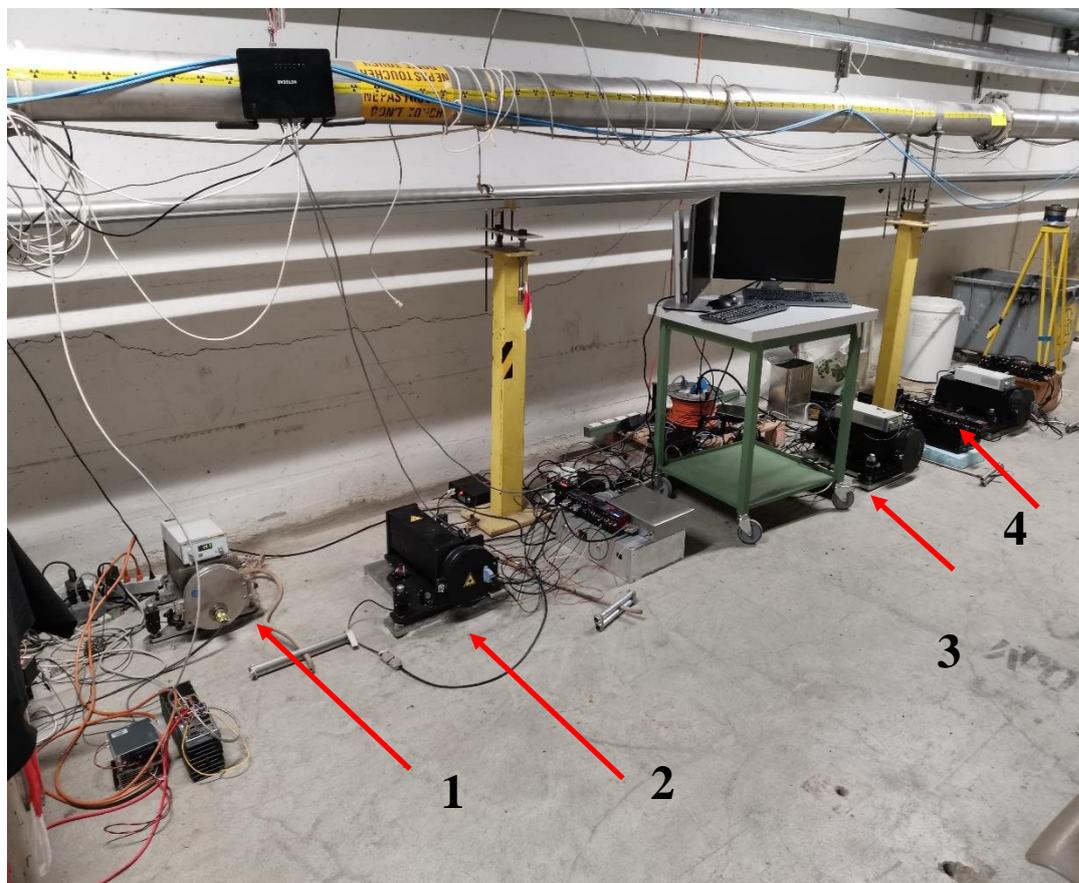


Рис.2 Четыре ПЛИ (ОИЯИ) в Транспортном Тоннеле №1(ЦЕРН)

Одновременная регистрация сигналов с инклинометров позволит визуализировать прохождение поверхностных сейсмических волн под коллайдером и также зарегистрировать медленное изменение геометрии тоннеля LHC. Полученные данные позволят учесть деформации коллайдера и - в дальнейшем - будут использованы для стабилизации его положения с целью увеличения его светимости.

В предыдущем продлении проекта планировалось создание сети из 6 ПЛИ. Эти планы по просьбе коллег из ЦЕРН были изменены до 4 ПЛИ в связи с использованием двух ПЛИ в работе Интерферометрической Антенны VIRGO. Данная часть работы будет выполнена во втором квартале 2021г., т.е. в сроки первого продления проекта.

3. Создание системы мониторинга угловых колебаний поверхности Земли на территории Интерферометрической Гравитационной Антенны (ИГА) VIRGO

Одно из **ключевых** достижений Метрологической Группы - установка двух Прецизионных Лазерных Инклинометров³ на территории Интерферометрической Гравитационной Антенны VIRGO (Рис.3)⁴[21]. Эта работа выполнена сверх обязательств ПТП.



Рис.3 Два ПЛИ ОИЯИ в помещении Северного Зеркала Интерферометрической Гравитационной Антенны ВИРГО

Основная задача применения ПЛИ на ИГА VIRGO - стабилизация его чувствительных элементов от угловых микросейсмических шумов. Размещение и непрерывная работа двух ПЛИ в течение более чем одного года явилось важнейшим

³ Предложение ак. В.А. Матвеева

⁴ Соглашение INFN-ОИЯИ-CERN

прорывом в экспериментах на ИГА VIRGO. Они продемонстрировали надёжность и необходимую точность измерений, что позволило приступить к следующему этапу использования малогабаритного ПЛИ непосредственно в вакууме ИГА.

В настоящее время два ПЛИ применяются в системе шумоподавления Северного Зеркала ИГА VIRGO.

Эти работы не были запланированы в первом продлении проекта и являются достижением, сравнимым с созданием сети из 4 ПЛИ в тоннеле LHC.

4. Прогноз землетрясений при помощи сети ПЛИ

Ведется работа по использованию инклинометра для задач прогноза землетрясений в международной геофизической обсерватории Гарни (Армения) (Рис.4).



Рис.4 ПЛИ ОИЯИ в Международной Геофизической обсерватории Гарни (Армения)

В этой обсерватории размещен один ПЛИ и нами ведётся создание сети из четырёх инклинометров в геофизических центрах Гюмри и Гарни.

Эти работы также не были запланированы в первом продлении проекта и являются дополнительной важной активностью Метрологической группы ЛЯП по применению

ПЛИ. В связи с таким применением ПЛИ отметим начало работы с Узбекистаном по прогнозу землетрясений⁵.

5. Лазерная Реперная Линия длиной 130м

Создание Лазерной Реперной Линии длиной 130м завершается. Введена в действие система вакуумных объёмов, соединённая вакуумными трубами с общей длиной распространения лазерного луча 130 м (Рис.5).

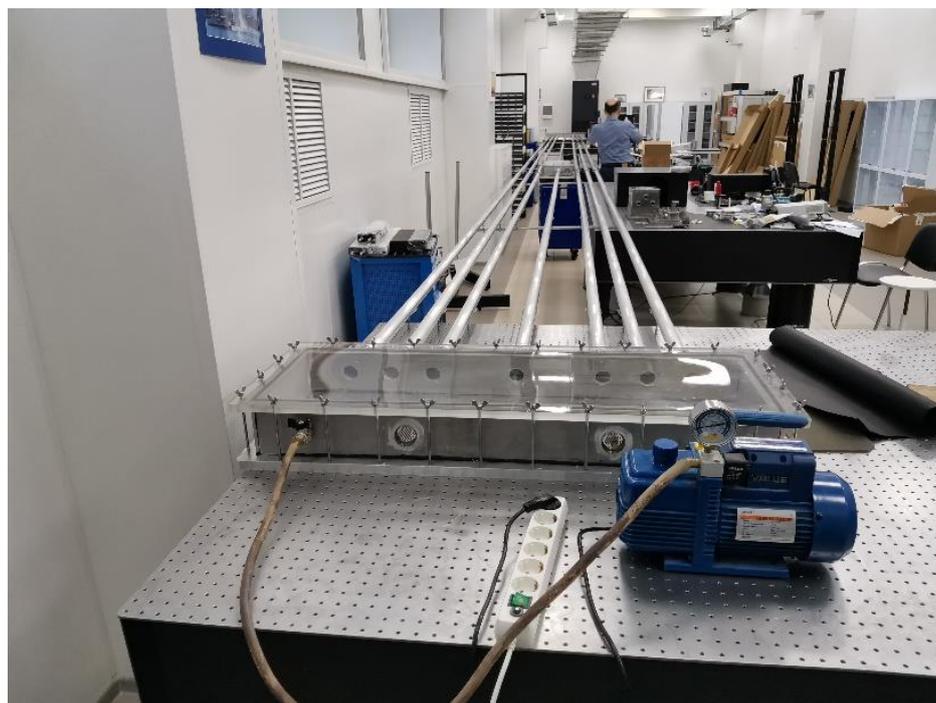


Рис.5 Лазерная Вакуумная Реперная Линия длиной 130м в Метрологической Лаборатории ЛЯП

Эксперименты на длине 18м выявили сильную зависимость параметров одномодового лазерного луча от качества зеркальных поверхностей в системе коллимирования лазерного луча. В настоящее время ведётся подготовка к производству таких зеркал.

ЛРЛ будет введена в действие к концу 2021г согласно предыдущему продлению проекта.

⁵ Соглашение ОИЯИ и АНРУз Узбекистан

6. Интерферометрический Измеритель Длины

Работы по Интерферометрическому Измерителю Длины обнаружили сильную зависимость чувствительности интерферометра от параметров воздушной среды. Проведены эксперименты на длине 0.1м (Рис.6). Достигнутая точность измерения длины составила $\pm 10\mu\text{м}$. Для достижения большей точности эксперименты по измерению длины переносятся в вакуумный объём. До конца года будет проведён эксперимент в вакуумных условиях.

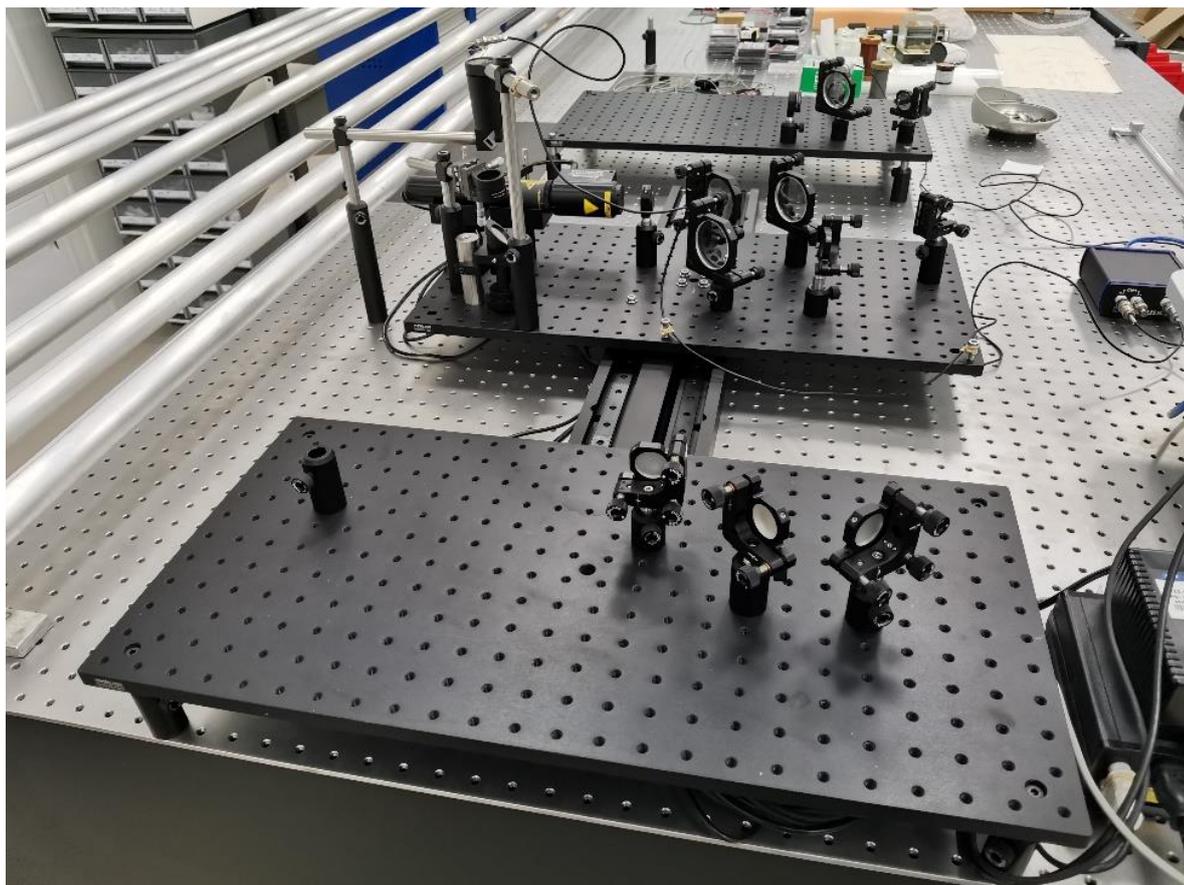


Рис.6 Метрологическая лаборатория ЛЯП: Интерферометрический Измеритель Длины ОИЯИ

В работах по созданию Интерферометрического Измерителя Длины впервые достигнуты результаты по измерению длины до 10см, с необходимой для применения в ЦЕРН, точностью (в соответствии с ПТП).

Измерения на длине до 16м будут выполнены в предлагаемом продлении проекта.

7. Исследовательская платформа, сейсмоизолированная от угловых колебаний поверхности Земли

Создаётся исследовательская, изолированная от угловых микросейсмических колебаний платформа (СИП). Платформа должна находиться в горизонтальном положении за счет системы обратной связи с Прецизионным Лазерным Инклинометром. Создание такой платформы **в будущих проектах** необходимо для проведения фундаментальных физических экспериментов (более точное измерение Гравитационной постоянной Ньютона G , эксперимент Майорана по поиску гравитационноподобных сил и др. [22]).

В настоящее время проведены измерения наклонов СИП с помощью инклинометра MINILEVEL при калибровочных наклонах $\approx 10^{-5}$ рад (Рис.7). Измеренные наклоны СИП согласуются с калибровочными.

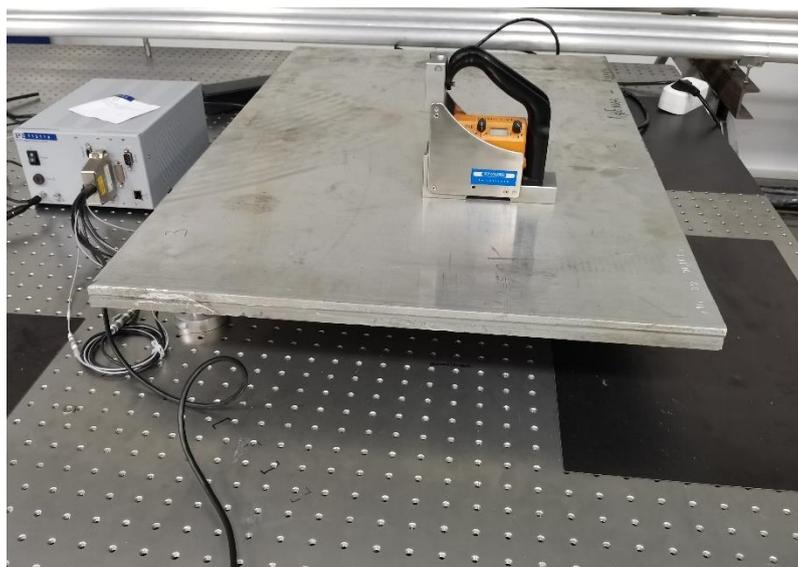


Рис.7 Внешний вид Исследовательской Платформы в Метрологической Лаборатории ЛЯП

Эта активность является дополнительной в первом продлении проекта. Для эффективной реализации этой части проекта необходимо создание Малогабаритного ПЛИ.

Мы продолжим эту активность и завершим её в предлагаемом втором продлении Проекта.

Задачи на второе продление Проекта

1. Малогабаритный монолитный Прецизионный Лазерный Инклинометр (МПЛИ)

Концепция малогабаритного монолитного Прецизионного Лазерного Инклинометра

Опыт разработки Прецизионного Лазерного Инклинометра показал: для создания эффективного инклинометра с чувствительностью в режиме онлайн $\sim 10^{-9}$ рад необходимо значительно уменьшить влияние внешних и внутренних источников шумов. Достаточно интенсивный и широкополосный шум проникает в систему регистрации ПЛИ через влияние атмосферного воздуха на распространение лазерного луча. Использование вакуума более чем в 100 раз [11,22]) уменьшило шумы ПЛИ в области 10^{-3} -10 Гц.

Внешнее изменение температуры воздушной среды деформирует конструкцию ПЛИ, в результате чего появляется низкочастотный шум (меньше 10^{-4} Гц) паразитных угловых наклонов. Для устойчивой работы ПЛИ необходимы термостабильные условия. В системе регистрации сигналов ПЛИ необходимы также стабильные условия работы регистрирующих АЦП и стабилизация мощности лазерного луча.

Современные условия проведения научного эксперимента с применением ПЛИ требуют устранения влияния всех вышеперечисленных источников шумов с дополнительным требованием обеспечения малогабаритности инклинометра.

Это, прежде всего, существенно при применении ПЛИ в Интерферометрической Гравитационной Антенне VIRGO. Одна из ключевых особенностей ИГА VIRGO - использование подвеса для зеркал интерферометра. Это связано с подавлением звукового канала передачи шумовых колебаний на Интерферометрическую Гравитационную Антенну. Вместе с тем, собственные частоты подвеса *резонансны* проходящим по поверхности Земли микросейсмическим волнам. Источниками микросейсмических колебаний являются волнение на море (Микросейсмический пик) и промышленные шумы (автотранспорт, работа вакуумных насосов и механизмов и др.) Поверхностные волны движутся со скоростью от 2 км/сек в частотном диапазоне 0.1-1 Гц до 400 м/сек на частотах 4-20 Гц. Поскольку расстояние между зеркалами в ИГА равно 3 км и более, то влияния микросейсмических волн на чувствительные элементы ИГА не коррелированы и, следовательно, требуется их независимая стабилизация.

Фактически требуется измерить угловое шумовое движение платформы, на которой крепится подвес Интерферометрического зеркала. Положение дел усложняется тем, что система подавления вертикальных и продольных сейсмических колебаний вносит дополнительный шум угловых наклонов, который также необходимо зарегистрировать.

Поскольку основание для подвеса зеркал ИГА имеет небольшие габариты, необходимо уменьшение габаритных размеров и массы ПЛИ. На данный момент требуется⁶ создание ПЛИ с габаритными размерами 20х20х20(см) и весом не более 10кг. *Это более чем в 8 раз меньше по объёму относительно предыдущего варианта (50х40х30см) и более чем в 6 раз меньше по весу(65кг).*

Малогабаритный монолитный Прецизионный Лазерный Инклинометр

Во втором продлении Проекта предлагается создание монолитного МПЛИ. В этом инклинометре будут решены следующие задачи:

-достижение уменьшенных линейных размеров (меньше 20х20х20см) и небольшая масса (меньше 10кг);

-значительное уменьшение зависимости показаний МПЛИ от температуры (введение терморезистивных элементов);

-использование позиционно-чувствительного метода делительных пластинок (значительное уменьшение габаритов оптической схемы ПЛИ, уменьшение влияния позиционных шумов фотоприёмника);

-обеспечение монолитности конструкции ПЛИ (все элементы ПЛИ имеют соединение при помощи анаэробного клея, что исключает температурно-зависимые изменения направления лазерных лучей);

-использование нового способа калибровки ПЛИ, основанного на интерферометрическом измерении величины пьезомодуля калибровочного пьезостакера.

В обычном ПЛИ, для регистрации положения отраженного от поверхности жидкости лазерного луча, используется квадрантный фотоприёмник. Наличие диэлектрического, разделяющего фотоприёмники промежутка шириной 30мкм, требует фокусировки лазерного луча в область с диаметром 100мкм. Используя формулу для диаметра сфокусированного лазерного луча

$$d = \frac{4}{\pi} \lambda \frac{F}{D} \quad \{1\}$$

⁶Второе Соглашение между ИНФН –ЦЕРН-ОИЯИ

где F - фокусное расстояния, D -диаметр коллимированного лазерного луча перед линзой, λ -длина волны света, для $D = 1\text{см}$ получим фокусное расстояние $F=100\text{см}$. Именно это обстоятельство создаёт нынешние габариты ПЛИ (50x40x30). При этом, вес такого ПЛИ превышает 60кг.

Мы предлагаем радикально уменьшить габаритные размеры и вес ПЛИ использованием относительно нового позиционно-чувствительного фотометрического метода делительных пластинок (ПЧФУ) [23-25]. Он основан на применении специально изготовленных делительных пластинок (Рис.8).

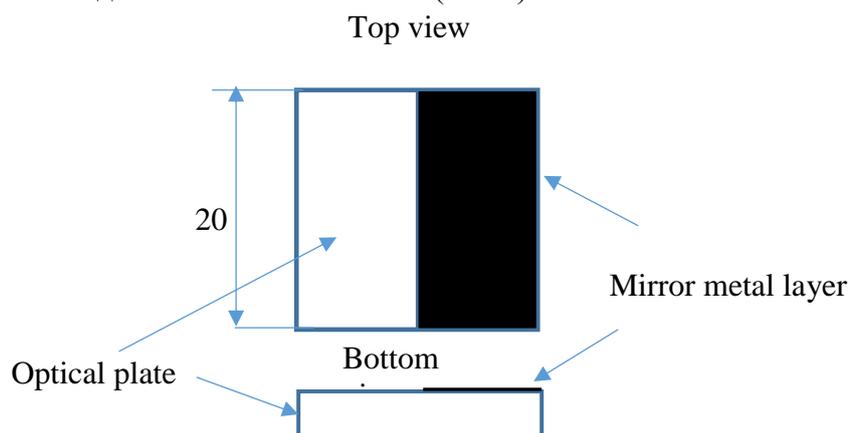


Рис.8 Расположение металлического отражающего слоя на плоскопараллельной диэлектрической пластинке

На поверхность плоскопараллельной пластины напыляется слой металла так, чтобы линия соединения металла и диэлектрической поверхности пластинки была прямой. Фокусируя лазерный луч на эту линию, удаётся разделить его на две части: одна проходит через прозрачную пластинку, другая часть лазерного луча отражается (Рис.9).

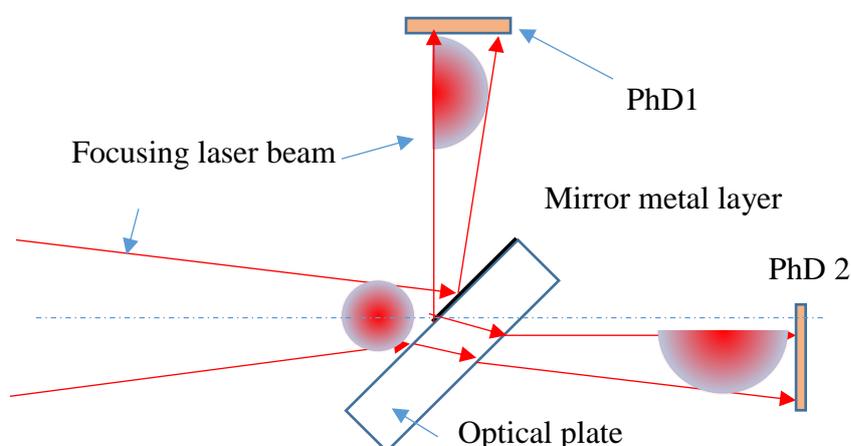


Рис. 9 Деление сфокусированного лазерного луча делительной пластинкой

Смещение пятна лазерного луча на делительной пластинке изменяет интенсивности прошедших и отражённых лазерных лучей. Измеряя изменение интенсивности разделённых лазерных лучей, мы получаем позиционно-чувствительное фотоприёмное устройство (ПЧФУ). В этом устройстве нет ограничения на диаметр лазерного луча и, соответственно, на фокусное расстояние лазерного луча. По предварительным оценкам {1} можно уменьшить фокусное расстояние лазерного луча до 7.5см и, соответственно, уменьшить габариты ПЛИ до 20x20x20(см.)

При уменьшении фокусного расстояния лазерного луча уменьшается диаметр фокуса. Это увеличивает трудности прецизионной юстировки ПЛИ.

Для достижения необходимой стабильности в Малогабаритном ПЛИ нами предлагается создание монолитной конструкции, с одновременным использованием терморезистивных элементов (Рис. 10) (наш патент РФ [25]).

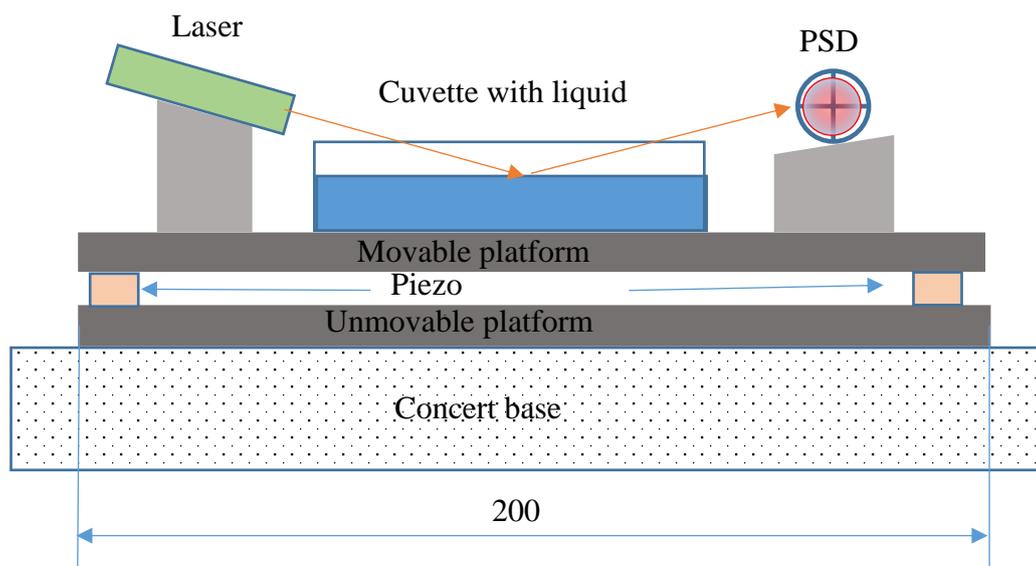


Рис.10 Расположение пьезостакеров (терморезистивных элементов) в Малогабаритном ПЛИ

В этом случае все элементы ПЛИ скрепляются анаэробным клеем на неподвижном основании. Подвижная платформа ПЛИ соединяется с неподвижной платформой при помощи одинаковых по размеру пьезостакеров. В этом случае изменение температуры изменяет размеры пьезостакеров, но не вызывает паразитных наклонов ПЛИ. Предлагаемое нами создание монолитной конструкции с использованием терморезистивности улучшит рабочие характеристики ПЛИ и уменьшит его шум.

Для юстировки лазерного луча в монолитном ПЛИ мы предлагаем юстировать ПЧФУ относительно центра фокусного пятна лазерного луча (Рис.11).

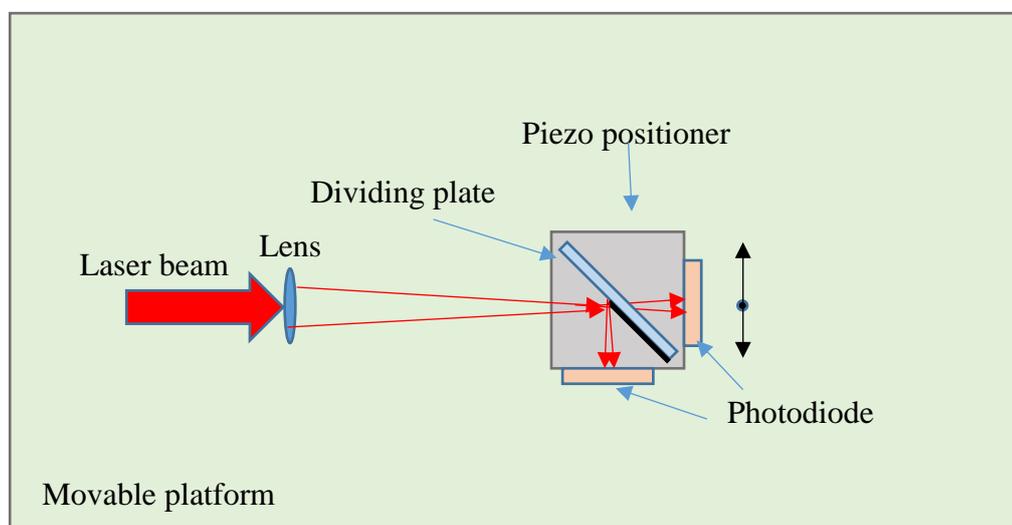


Рис.11 Юстировка положения фокуса лазерного луча на делительной пластинке при помощи пьезопозиционера

Предлагается в конструкции монолитного ПЛИ разместить ПЧФУ на пьезопозиционер и юстировать ПЧФУ на фокус лазерного луча в ПЛИ. Это позволит избежать ухода лазерного луча после откачки воздуха из вакуумного объёма.

Для МПЛИ будет разработана плата управления, обеспечивающая дистанционные контроль, калибровку, юстировку прибора и запись сигналов.

Создание МПЛИ существенно уменьшит трудозатраты в изготовлении инклинометра и стоимость его необходимых электрооптических компонентов.

Этапы	Начало	Окончание
Конструирование МПЛИ и изготовление	2021	2022
Тестирование в составе ИГА VIRGO и в Тоннеле LHC	2022	2023
Тестирование МПЛИ для прогноза землетрясений(Армения ,Узбекистан)	2022	2023

Использование монолитного МПЛИ в работе Интерференционной Гравитационной Антенны ВИРГО

Для обеспечения работы ИГА VIRGO требуется до 10 комплектов МПЛИ⁷.

Работа МПЛИ в составе ИГА VIRGO требует существенной адаптации МПЛИ к условиям глубокого вакуума (необходимо использование специальных вакуумных позиционеров, создание герметичной кюветы с жидкостью и др.). Необходимые работы для создания согласованной конструкции будут начаты после предварительной апробации МПЛИ в зоне расположения ИГА VIRGO.

Этапы	Начало	Окончание
Тестирование в составе ИГА VIRGO	2022	2023
Конструирование и изготовление МПЛИ для работы в глубоком вакууме	2022	2023
Тестирование МПЛИ для стабилизации зеркал VIRGO	2023	2023

Разработка криогенного малогабаритного ПЛИ для ИГА третьего поколения «Телескоп Эйнштейна»

Работа МПЛИ в составе ИГА VIRGO является крайне важным, но лишь первым этапом, в использовании ПЛИ в ИГА третьего поколения - «Телескоп Эйнштейна» (Второе Соглашение между ИНФН –ЦЕРН-ОИЯИ) [26].

Для этой гравитационной антенны требуется работа ПЛИ в криогенных условиях при температуре жидкого Ne (23-24 °K). В качестве горизонтизирующей жидкости используется жидкий Ne.

Предлагается в продлеваемом Проекте начать создание прототипов МПЛИ на основе сжиженных газов:

- этанол (комнатная температура),
- сжиженный углекислый газ (-58⁰C),
- жидкий азот (77⁰K),
- далее будет осуществлён переход на жидкий Неон (23-24 °K) в МПЛИ. Это

обеспечит работу ИГА третьего поколения в условиях изоляции от микросейсмических угловых шумов.

Для этого будет разработана концепция принципиальной схемы криогенного МПЛИ. Конкретно - это обеспечение работоспособности пьезомоторов и пьезостакеров и фотоприёмников в условиях низких температур.

⁷ Второе Соглашение ИНФН– ЦЕРН-ОИЯИ

Этапы	Начало	Окончание
Разработка конструкции замкнутой кюветы для этанола	2021	2022
Тестирование МПЛИ с замкнутой кюветой в вакууме	2022	2023
Разработка конструкции замкнутой кюветы для сжиженного углекислого газа	2022	2023

Система визуализации угловых микросейсмических наклонов земной поверхности для коллайдера НИКА⁸ и ЛНС⁹ при помощи МПЛИ

Микросейсмические наклоны земной поверхности существуют в широком диапазоне частот от 10^{-6} Гц до 20 Гц. Фактически доминируют два микросейсмических явления в разных диапазонах частот:

-высокочастотные поверхностные микросейсмические волны. Это поверхностные волны от ветровой нагрузки на поверхность океанов и морей (Микросейсмический Пик) и индустриальные шумы (движение железнодорожного и автомобильного транспорта, работа вакуумных насосом и др.)

-низкочастотное изменение наклонов поверхности Земли (влияние Луны и Солнца), просадка грунта (подземные реки под ЛНС), сезонное движение грунтовых вод (НИКА).

Система визуализации угловых микросейсмических наклонов земной поверхности (сеть ПЛИ) - это прежде всего система, которая может в течение длительного времени следить за угловыми параметрами поверхности Земли. Система позволит визуализировать движение ускорительных модулей коллайдера от воздействия источников угловых движений первого и второго типа.

Таким образом, необходимо одновременно решить две задачи.

- *Первая задача*

Осуществление визуализации угловых микросейсмических колебаний поверхностных микросейсмических волн в диапазоне частот 10^{-2} -20 Гц. В диапазоне 1-10 Гц колебаний поверхности Земли возникают максимальные смещения пучков сталкивающихся частиц, как на коллайдере НИКА, так и на ЛНС, в результате которых, фокусы пучков частиц в коллайдере расходятся.

При определённой амплитуде таких колебаний ($\approx 5 \cdot 10^{-6}$ рад по нашей оценке) расхождение пучков частиц может быть существенным. Поэтому необходимо разработать

⁸ Предложение ак. Г.В. Грубникова

⁹ Соглашение ЦЕРН - ОИЯИ

не только систему регистрации положения поверхности Земли под коллайдером, но и систему стабилизации коллайдера при деформации его поверхностными волнами.

- *Вторая задача*

Для получения максимальной светимости коллайдера крайне важно зарегистрировать медленное движение поверхности Земли - так называемые Ground Motion. Такое движение Земли медленно деформирует коллайдер. В этом случае движение пучков, из-за прохождения их в градиентных магнитных полях, меняет свои параметры, которые могут выходить за проектные допуски. В этих условиях важно остановить деформацию коллайдера и стабилизировать его. Такая система визуализации, как представляется, необходима как для коллайдера НИКА, так и для коллайдера ЛНС и будущего коллайдера FCC.

Решение вышеупомянутых задач требует участие команды специалистов по ускорителям, что выходит за рамки данного продления проекта.

В продлеваемом Проекте предусматривается размещение малогабаритного ПЛИ непосредственно в зоне расположения коллайдера НИКА (Рис.13).



Рис.13 Расположение коллайдера НИКА относительно основных источников микросейсмических шумов (автомобильная и железная дороги)

Будет измерен угловой микросейсмический шум в широком диапазоне частот. Эти исследования помогут определить параметры будущей *сети* из Прецизионных Лазерных Инклинометров

Этапы	Начало	Окончание
Установка МПЛИ на полу коллайдера НИКА	2021	2022
Определения угловой микросейсмической активности в зоне расположения коллайдера НИКА	2022	2023
Разработка принципиальной схемы сети МПЛИ для коллайдера НИКА	2022	2023

Создание сети из четырёх Монолитных ПЛИ в Армении для прогноза Землетрясений¹⁰

Одно из важных направлений применения ПЛИ - прогноз землетрясений.

В этом случае Прецизионный Лазерный Инклинометр работает в режиме регистрации низкочастотных и особо низкочастотных колебаний поверхности Земли. Диапазон частот регистрируемых колебаний составляет 10^{-8} - 10^{-3} Гц. При этом необходимо наблюдать движение поверхности Земли в пределах от одного года с временным разрешением примерно 20 минут.

Такая возможность позволит определить угловые наклоны в точках размещения ПЛИ и затем, зная расстояние между инклинометрами, количественно определить движение земной коры. Анализ движения земной коры даёт возможность обнаружить зоны накопления сейсмической энергии (область будущих землетрясений). Зная расположение зон накопления сейсмической энергии, их процесс формирования, представляется возможным, прогнозировать развитие сейсмической активности в области расположения сети ПЛИ.

В дальнейшем эту зону можно наблюдать уже при помощи обычных сейсмометров и сейсмофонов, которые будут определять наличие сейсмической активности поверхности земли перед землетрясениями. Это - так называемые foreshocks. Foreshocks являются предвестниками землетрясения. Их появление означает, что формируется первичная трещина, вдоль которой будет происходить развитие землетрясения. Как правило, foreshocks происходят перед землетрясениями за сутки и это позволяет организовать эвакуацию людей из опасного района.

¹⁰ Соглашение Армения ОИЯИ

В условиях Армении наблюдается несколько крупных разломов земной коры. В районе этих разломов планируется разместить несколько инклинометров и провести совместное наблюдение за движением земной коры.

Такое использование ПЛИ имеет теоретическое обоснование, данное академиком АН Армении Л.А. Аголюбяном. На этой основе им показана в докладе на семинаре в ЛЯП 20 ноября 2019г. возможность прогноза землетрясений при помощи высокоточной инклинометрии. Использование монолитных ПЛИ ввиду возможности организации длительных наблюдений наклонов земной поверхности, с его точки зрения, является крайне важным для организации количественного прогноза землетрясений.

Для создания сети наблюдения за наклонами земной поверхности необходимо разместить ПЛИ на территории со средним шагом, соответствующим размерам действия землетрясения с Магнитудой более 6 Mw (начиная с этой магнитуды, наблюдается особо крупные разрушения домов, дорог и объектов народного хозяйства). Экспериментальные данные наблюдения подобных землетрясений говорят о зоне действия землетрясения до 10км.

Предлагается, в продлеваемом Проекте, создание *первичной* сети из четырёх малогабаритных ПЛИ. Развёртывание такой сети позволит экспериментально осуществить длительное наблюдение за угловыми движениями поверхности Земли, подготовить необходимую инфраструктуру для обслуживания инклинометров сети, разработать программное обеспечение для обслуживания сети. На прототипе сети, состоящей из четырёх монолитных ПЛИ, планируется определить параметры будущей сети: среднее расстояние между инклинометрами, периодичность измерения и др.

После завершения работы по монолитному Прецизионному Лазерному Инклинометру, планируется произвести необходимое количество монолитных МПЛИ для прогноза землетрясений и разместить первичную сеть в Армении в ближайшие три года.

Этапы	Начало	Окончание
Установка МПЛИ в Международной геофизической обсерватории Гарни	2021	2022
Мониторинг микросейсмической активности в зоне разлома земной коры в ГАРНИ	2022	2023
Изготовление 3-х образцов МПЛИ (при наличии финансирования) и размещение их в геофизических центрах в Армении.	2022	2023

2. Сопутствующие метрологические активности

Лазерная Реперная Линия длиной 130 м

В изготовленных и собранных вакуумных объёмах Лазерной Реперной Линии планируется проводка лазерного луча на длину 130м и начало проведения физических экспериментов.

Планируемый список экспериментов на ЛРЛ:

1. *Определение точности позиционирования лазерного луча в вакууме на длине от 18м до 130м*

В эксперименте планируется исследовать поведение лазерного луча в условиях действия угловых микросейсмических колебаний.

2. *Определение точности долговременных измерений ЛРЛ на длине 130м*

В эксперименте планируется определить долговременную стабильность ЛРЛ на длине 130м за длительный период (сутки).

3. *Определение точности измерения с использованием сейсмоизолированных платформ.*

В эксперименте будет найдена предельная точность позиционирования ЛРЛ в условиях отсутствия угловых микросейсмических колебаний.

4. *Измерения смещения пробного объекта относительно стабильной ЛРЛ.*

При достижении предельной стабильности в ЛРЛ будет исследовано смещение пробного объекта относительно ЛРЛ. Планируется измерить долговременное движение пробного объекта относительно стабильной лазерной реперной линии.

5. *Сравнение движения лазерного луча в трубах при атмосферном давлении относительно вакуума.*

В эксперименте будет продолжено исследование ранее найденного эффекта стабилизации Лазерного луча в закрытых трубах [27]. Будет определены параметры такого ослабления относительно стабильной ЛРЛ в вакууме.

Проведение экспериментов с лазерной реперной линией завершится определением её точностных и временных характеристик (исследование зависимости точности измерения ЛРЛ от времени непрерывных измерений).

После проведения экспериментов планируется защита двух диссертаций кандидатов физ - мат наук.

Этапы	Начало	Окончание
Проведение экспериментов на ЛРЛ без угловой	2021	2022

стабилизации платформ ЛРЛ		
Проведение экспериментов на ЛРЛ с угловой стабилизации платформ ЛРЛ	2022	2023
Эксперимент по сравнению распространения лазерного луча в закрытой трубе и в вакууме	2022	2023

Интерферометрический измеритель длины

Для преодоления влияния атмосферы на точность измерения планируются эксперименты по измерению длины в вакууме с целью получения предельной точности измерения.

Для этих целей все элементы интерферометрического измерителя длины будут размещены в вакуумном боксе.

Для увеличения длины измерения будет создана обрабатывающая программа, которая в режиме онлайн определяет текущую координату движения каретки в ИИД. Применение обрабатывающей программы позволит избежать информационного переполнения в системе измерения и увеличит длину измерения до 2м. После апробации ИИД на длине 2м, он будет размещён на полу Метрологической Лаборатории на метрологических рельсах для проведения полномасштабных измерений длины до 16м.

Напомним, Интерферометрический измеритель длины необходим для соединения координатных систем ускорителей (коллайдера), разъединённых детекторным комплексами.

Этапы	Начало	Окончание
Проведение экспериментов на Интерферометрическом Измерителе длины в вакууме	2021	2022
Написание программы по онлайн обработке сигналов ИИД	2022	2023
Проведение экспериментов с новой онлайн программой на длине 2м -16м	2022	2023

Сейсмоизолированная от угловых колебаний поверхности Земли исследовательская платформа

После изготовления малогабаритного монолитного ПЛИ планируется проведение экспериментов на Сейсмоизолированной Исследовательской Платформе (СИП) с размерами 1x1(м).

Основная цель таких экспериментов - продемонстрировать угловую сейсмоизоляцию платформы, определить разброс угловых колебаний стабилизированной платформы и возможность угловой сейсмизации оптического стола с размерами 3x1.5м. Вторым этапом проведения экспериментов является сейсмоизоляция оптического стола.

Эксперименты по СИП будут завершены в течение второго продления Проекта.

На сейсмоизолированном от угловых колебаний поверхности Земли оптическом столе в будущем планируется проведение фундаментальных физических экспериментов (измерение гравитационной постоянной Ньютона G с большей точностью, эксперимент Майорана по поиску гравитационно-подобных сил, эксперименты с весами Киббла и др. [20,26,28]).

Этапы	Начало	Окончание
Проведение экспериментов на малой сейсмоизолированной платформе с МПЛИ	2021	2022
Проведение экспериментов на большой сейсмоизолированной платформе (оптический стол) с двумя МПЛИ	2022	2023
Сейсмоизоляция оптических столов ЛРЛ при помощи СИП	2022	2023

Выводы

Второе продление Проекта происходит в условиях интенсивного совершенствования параметров Прецизионного Лазерного Инклинометра. Успехи, достигнутые при помощи ПЛИ, открывают возможность использовать этот прибор в нескольких исследовательских направлениях. Самым важным направлением применения ПЛИ является использование его для регистрации угловых микросейсмических колебаний крупномасштабных физических установок.

При новом продлении Проекта планируется ввести в эксплуатацию уникальный новый прибор - *монолитный малогабаритный ПЛИ*. Этот прибор может исследовать угловые микросейсмические колебания в более широком диапазоне частот, что существенно расширит область применения Прецизионного Лазерного Инклинометра в физическом эксперименте.

Новый прибор позволит начать планомерную работу по созданию сети с целью прогноза землетрясений в сейсмоопасных зонах Армении и Узбекистана.

Для коллайдеров НИКА, ЛНС и FCC применение этого прибора позволит кардинально улучшить параметры их пространственной стабильности.

Весьма перспективно применение МПЛИ для стабилизации Интерферометрических Гравитационных Антенн. Без этого прибора практически невозможно стабилизировать угловые микросейсмы, как для действующих VIRGO, LIGO, так и для будущей Интерферометрической Гравитационной Антенны – Телескоп Эйнштейна.

Для ИГА третьего поколения планируется развитие ПЛИ для работы в криогенных условиях. В проекте планируется начать R&D для МПЛИ, который будет работать на криогенных жидкостях, и мы надеемся, что в дальнейшем ОИЯИ примет участие с методикой криогенного Малогабаритного Прецизионного Лазерного Инклинометра в проекте ИГА третьего поколения - Телескоп Эйнштейна.

Литература

1. V. Batusov, J. Budagov, M. Lyablin, G. Shirkov, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl The calibration of the Precision Laser Inclinator Physics of Particles and Nuclei Letters December 2015, Volume 12, Issue 7, pp 819–823

2. N. Azaryan, V. Batusov, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, G. Trubnikov, G. Shirkov, J.-Ch. Gayde 1, B. Di Girolamo , D. Mergelkuhl , M. Nessi

The precision laser inclinometer long-term sensitivity in thermo-stabilized conditions Presented by M. Lyablin at CLIC Workshop 2015 (26-30 January 2015, ЦЕРН) Dubna E13-2015-35

3. B. Di Girolamo , J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl, M. Schaumann, J. Wenninger, Switzerland N. Azaryan, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, G. Shirkov, G. Trubnikov, Russia The monitoring of the effects of earth surface inclination with the precision laser inclinometer for high luminosity colliders Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia, P. 210-212

4. N. Azaryan, J. Budagov, J.-Ch. Gayde, B. Di Girolamo, V. Glagolev, M. Lyablin D. Mergelkuhl, G. Shirkov The Innovative Method of High Accuracy Interferometric Calibration of the Precision Laser Inclinator Physics of Particles and Nuclei Letters, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 112–122. 2017

5. N. Azaryan, V. Batusov, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, Trubnikov, G. Shirkova, J.-Ch. Gayde, B. Di Girolamo, A. Herty, H. Mainaud Durand, D. Mergelkuhl, V. Rude Comparative Analysis of Earthquakes Data Recorded by the Innovative Precision Laser Inclinator Instruments and the Classic Hydrostatic Level System *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 480–492. © Pleiades Publishing, Ltd., 2017

6. N. Azaryan, J. Budagov, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl Determination of the maximum recording frequency by the Precision Laser Inclinator of an earth surface angular oscillation *Physics of Particles and Nuclei Letters* November 2017, Volume 14, Issue 6, pp 920–929

7. Компенсация углового шумового колебания лазерного луча в Прецизионном Лазерном Инклинометре Н.С. Азарян, Ю.А. Будагов, М.В. Ляблин, А.А. Плужников, Б Ди Джироламо, Ж-Кр. Гайде, Д. Мергелькуль P13-2017-34

8. N. Azaryan, J. Budagov, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl The compensation of the noise due to angular oscillations of the laser beam in the Precision Laser Inclinator *Physics of Particles and Nuclei Letters* November 2017, Volume 14, Issue 6, pp 930–938

9. Определение Максимальной частоты угловых колебаний поверхности Земли регистрируемых Прецизионным лазерным Инклинометром Н.С. Азарян, Ю.А. Будагов, М.В. Ляблин, А.А. Плужников, Б Ди Джироламо, Ж-Кр. Гайде, Д. Мергелькуль P13-2017-35

10. Azaryan, N.; Budagov, J.; Lyablin, M.; Pluzhnikov, A.; Gayde, J.-Ch.; Di Girolamo, B.; Mergelkuhl, D. The temperature stability of 0.005°C for the concrete floor in the ЦЕРН Transfer Tunnel #1 hosting the Precision Laser Inclinator *Physics of Particles and Nuclei Letters*, Volume 14, Issue 6, pp.913-919

11. Professional Precision Laser Inclinator: the Noises Origin and Signal Processing

N. Azaryan, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, A. Seletsky, G. Trubnikova, B. Di Girolamo, J.-C. Gayde & D. Mergelkuhl *Physics of Particles and Nuclei Letters* volume 16, №3 pages 264–276 (2019)

12. The Seismic Angular Noise of an Industrial Origin Measured by the Precision Laser Inclinator in the LHC Location Area N. Azaryan, J. Budagov, V. Glagolev, M. Lyablin, A. Pluzhnikov, A. Seletsky, G. Trubnikov, B. Di Girolamo, J.-C. Gayde & D. Mergelkuhl *Physics of Particles and Nuclei Letters* volume 16, №4 pages 343–353 (2019)

13. Position-Sensitive Photoreceivers: Sensitivity and Detectable Range of Displacements of a Focused Single-Mode Laser Beam N. S. Azaryan, J. A. Budagov, M. V. Lyablin, A. A. Pluzhnikov, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde & D. Mergelkuhl *Physics of Particles and Nuclei Letters* volume 16, №4 pages 223
14. Colliding Beams Focus Displacement Caused by Seismic Events N. S. Azaryan, J. A. Budagov, M. V. Lyablin, A. A. Pluzhnikov, G. Trubnikov, G. Shirkov, O. Bruning, B. Di Girolamo, J.-Ch. Gayde, D. Mergelkuhl & L. Rossi *Physics of Particles and Nuclei Letters* volume 16, №4 pages 377–396 (2019)
15. The compact nanoradian precision laser inclinometer – an innovative instrument for the angular microseismic isolation of the interferometric gravitational antennas Julian Budagov, Beniamino Di Girolamo, Mikhail Lyablin *PEPAN Letters* Vol 17, No 7 (2020)
16. The methods to improve the thermal tolerance of the Compact Precision Laser Inclinometer Julian Budagov, Beniamino Di Girolamo, Mikhail Lyablin *PEPAN Letters* Vol 17, No 7 (2020)
17. Будагов Ю. А. Ляблин М. В., Устройство для измерения углов наклона поверхности Патент на изобретение № 2734451 РФ
18. Будагов Ю. А. Ляблин М. В., Устройство для измерения угла наклона, Патент на изобретение № 2510488 РФ
19. Соглашение INFN-ОИЯИ-ЦЕРН август 2019
20. Majorana, Q., (1920). «On gravitation. Theoretical and experimental researches», *Phil. Mag.* [ser. 6] 39, 488—504
21. В.Ю Батусов, Ю.А.Будагов, М.В.Ляблин Лазерный датчик угловой компоненты сейсмических колебаний P13-2011-124
22. P.E. Rutten, High speed two-dimensional optical beam position detector, *Rev. Sci. Instrum.* 82 (7) (2011) 073705–073705-7.
23. Low noise position sensitive detector for optical probe beam deflection measurements J.D. Spear, and R. E. Russo . *Review of Scientific Instruments* *Rev. Sci. Instrum.* 67 (7), July 1996
24. G. A. Michelet and J. P. Trenton, Dispositif de positionnement automatique d'un faisceau laser, French patent, FR 2 616 555–A1 (15 June 1987)
25. Будагов Ю. А. Ляблин М. В Лазерный инклинометр для длительной регистрации угловых наклонов земной поверхности Патент на изобретение № 2740489 РФ
26. M. Maggiore, and others, Science case for the Einstein telescope, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* March 2020

27. Батусов В.Ю. Будагов Ю.А. Ляблин М.В. Сисакян. А.Н. «Устройство для формирования лазерного луча» Патент на изобретение № 2401986 РФ

28. C. Xue1 and others, Precision measurement of the Newtonian gravitational constant, National Science Review 7: 1803–1817, 2020

Table.

Employment of the Metrological group (Sec.No. 3, group No. 1 of NEOMAP DLNP JINR) in the work of the project "Precision Laser Metrology for Accelerators and Detector Complexes"

№	Name	FTE	Positon	Work (apart common duties like shifts)
1	Lyablin M.V.	1	Senior Researcher	optics, general management
2	Atanova O.S.	1	engineer	PLI data visualization
3	Atanov N.S.	1	Researcher	Seismically isolated platform
4	Batusov V.Yu.	0.2	Researcher	PLI at CERN
5	Bednyakov I.V.	1	engineer	PLI programming
6	Budagov Yu.A.	0.6	Chief Researcher	general leadership
7	Klimeshov Yu.V.	1	engineer	PLI programming
8	Krasnopyorov.A	0.9	Researcher	PLI programming
9	Kuzkin A.M.	1	senior engineer	production, adjustment of PLI
10	Ni R.V.	1	engineer	optics, PLI adjustment
11	Pluzhnikov A.A.	1	engineer	Laser Fiducial Line Adjustment, PLI
12	Torosyan G.T.	1	Senior Researcher	Earthquake forecast with help. PLI
13	Seletsky A.A.	0.3	engineer	PLI design
14	Studenov S.N.	1	mechanic	Mechanical work
15	Artikov A.M.	0.1	Senior Researcher	earthquake forecast
	Total FTE	12.1		

