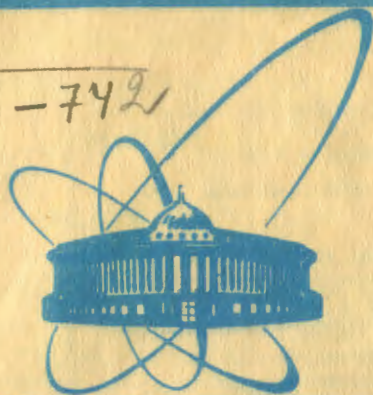


Б-742



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

сф

2218/2-81

11/5-81

P13-81-95

П.Н.Боголюбов, А.Ф.Писарев, Н.С.Шавохина

ИЗЛУЧЕНИЕ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ
ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН
В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

1981

ВВЕДЕНИЕ

Проблема существования гравитационных волн в настоящее время находится в центре внимания многих ведущих ученых и ряда исследовательских институтов. До сих пор предпринимались лишь попытки обнаружить гравитационные волны астрофизического характера. Усилиями многих национальных лабораторий установлена верхняя вероятностная граница потока энергии гравитационных волн от астрофизических объектов, составляющая на поверхности Земли величину $< 10^5$ эрг/см²с⁻¹. Предпринимаются большие усилия по повышению чувствительности приемной аппаратуры и доведения ее до уровня 10^1 - 10^2 эрг/см²с. Надо, однако, заметить, что наши знания о возможных астрофизических источниках гравитационных волн весьма эвристичны. Наиболее достоверные оценки можно сделать лишь для гравитационных потоков, идущих от бинарных компактных звезд с периодом обращения в несколько часов. При достаточно разумных предположениях о параметрах этих источников гравитационный поток в окрестности Земли не превышает величины 10^{-10} эрг/см²с. Таким образом, разрыв между наиболее вероятным ожидаемым гравитационным потоком и уровнем достигнутой чувствительности современных детекторов чрезвычайно велик. Ясно, что назрела настоятельная необходимость в тщательном и всестороннем анализе возможностей постановки чисто лабораторного опыта, в котором одновременно использовались бы искусственный излучатель гравитационных волн и их приемник. В таких лабораторных опытах можно эффективно применять принцип синхронного детектирования гравитационных волн и четко управлять параметрами эксперимента.

Настоящее краткое сообщение посвящено решению именно этой задачи. Рассматриваются два варианта гравитационного эксперимента в лабораторных условиях, в одном из которых используются излучатель и приемник гравитационных волн в оптическом диапазоне частот, а в другом - в СВЧ диапазоне частот.

ИЗЛУЧЕНИЕ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Предлагается создать искусственный излучатель гравитационных волн в оптическом диапазоне - гразер. В качестве основы этого излучателя выдвигается принцип когерентного параметри-

ческого преобразования лазерного света в гравитационную волну в оптически прозрачной среде. Световые волны формируют в среде пространственную "решетку" сфазированных по объему колебаний электронных и молекулярных масс, которые становятся, в свою очередь, квадрупольно-массовыми когерентными излучателями монохроматических гравитационных волн. В частности, если через замороженный в матрице водород /или азот/, молекулы которого выстроены в заданном направлении, пропустить два лазерных луча с разностью частот, равной частоте молекулярных колебаний водорода, и обеспечить пространственно-волновой синхронизм между результирующей световой волной и гравитационной волной, мощность гравитационного потока W составит

$$W = \frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot G N_1^2 L_1^2 S (\partial\alpha/\partial q)_0^4 T_2^4 P_1^2 P_2^2}{m^2 c^7 n_1^2 n_2^2} \text{ эрг/с,} \quad //1/$$

где N_1 , m , $(\partial\alpha/\partial q)_0$ - плотность, приведенная масса и поляризуемость молекул H_2 /или N_2 /; G - гравитационная постоянная; c - скорость света; L_1 , S , $n_{1,2}$ - длина, сечение и показатель преломления вещества гравитационного излучателя на частотах ω_1 и ω_2 ; T_2 - поперечное время релаксации; P_1 и P_2 - мощности лазерных потоков с частотами ω_1 и ω_2 . Приняв, например, параметры опыта с водородом такими: $L_1 = 10^3$ см; $S = 10^2$ см²; $n_{1,2} = 1,1$; $P_1 = P_2 = 4,7 \cdot 10^9$ Вт/см²; $N_1 = 10^{22}$ см⁻³; $T_2 = 10^{-6}$ с; $(\partial\alpha/\partial q)_0 = 1,7 \cdot 10^{-32}$ см⁴, получим мощность когерентного гравитационного излучения $W = 4$ эрг/с на двойной частоте молекулярных колебаний.

Эффективная регистрация этого излучения может быть осуществлена путем параметрического смешивания гравитационной и световой волны от мощного лазера в прозрачном диэлектрике с узкой зоной электронного перехода, например, в Si или ZnSb. В результате будет генерироваться новая световая волна на комбинационной частоте $\omega_4 = \Omega - \omega_3$ мощностью

$$P_4(\omega_4) = \frac{32\pi^3 G N_2^2 e^4 \Omega^2 \omega_4^2 L_2^2 P_3 W S_4}{(m^*)^2 c^5 n_3 n_4 S_4 S_1 [(\omega_0^2 - \omega_3^2)^2 + \omega_3^2 \gamma_2^2] [(\omega_0^2 - \omega_4^2)^2 + \omega_4^2 \gamma_2^2]} \text{ эрг/с,} \quad //2/$$

где e - заряд электрона; N_2 - плотность связанных электронов в оптической среде, участвующих в поляризации; L_2 - длина детектора; P_3 - мощность лазера "подсветки" на частоте ω_3 ; W - мощность гравитационного луча на частоте Ω ; S_3 , S_4 , S_1 - сечения световых и гравитационного лучков; ω_0 - ширина зоны переходов; $\gamma_2 = T_2^{-1}$ - постоянная спин-спиновой релаксации электронов в веществе; m^* - эффективная масса электронов; n_3 , n_4 - показатели преломления света на частотах ω_3 и ω_4 .

Если в качестве рабочего вещества детектора использовать замороженный до температуры жидкого гелия кристалл $ZnSb$ длиной 10^2 см, сечением 1 см² и принять мощность лазера накачки $P_3 = 5 \cdot 10^8$ Вт/см², мощность гравитационного луча $W = 4$ эрг/с, то интенсивность вновь генерируемой световой вспышки на частоте ω_4 составит $\sim 10^{-3}$ эрг/с. Такой поток после резонансной фильтрации регистрируется современной оптической аппаратурой.

ИЗЛУЧЕНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

Гравитационные волны в СВЧ диапазоне предлагается возбуждать мощными гиперзвуковыми колебаниями в твердом теле, которые возникают в нем под действием СВЧ волны или лазерного света в результате рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. В частности, создавая по толщине плоского круглого диска с отверстием по центру гиперзвуковые колебания $\epsilon_0 \cos k_1 z \cdot \cos k_2 R \cdot \sin \omega t$, можно получить в окрестности центра стоячую цилиндрическую гравитационную волну:

$$h_{zz} = \frac{\pi G \rho_0 \epsilon_0^2 \omega^2 d^3 (R_2 - R_1) J_0(k_2 r)}{12 \cdot c^4} \cos(2\omega t + \phi), \quad /3/$$

где k_1 - волновой вектор колебаний; k_2 - волновой вектор порождаемой гравитационной волны; ρ_0 - плотность материала диска; ϵ_0 - амплитуда упругой деформации вещества в гиперзвуковой волне; d - толщина излучателя; R_1, R_2 - внутренний и внешний радиусы диска; $0 \leq r \leq R_1$; $J_0(k_2 r)$ - функция Бесселя; ω - частота гиперзвуковой волны; ось z совмещена с осью аксиальной симметрии диска. При лабораторных масштабах аппаратуры: $d = 3$ см, $R_1 = 10^2$ см, $R_2 = 2 \cdot 10^2$ см, $\omega = 2 \cdot 10^{11}$ рад/с⁻¹, вещество излучателя Zn или CdS при температуре жидкого азота; $\epsilon_0 = 10^{-3}$, сходящийся гравитационный поток по мощности составит ~ 30 эрг/с⁻¹. Указанная деформация кристалла $\epsilon_0 = 10^{-3}$ может быть получена, например, с помощью лазера на неодимовом стекле с энергией излучения 10^4 Дж.

Для приема полученной гравитационной волны можно использовать плоский многосекционный коаксиальный резонатор из сверхпроводящего материала, помещенный в центре излучателя. Стенки резонатора должны быть совмещены с пучностями стоячей гравитационной волны. В таком детекторе будет эффективно генерироваться электромагнитное поле благодаря резонансной раскачке электронов проводимости под действием гравитационной волны. Мощность этого сигнала

$$\mathcal{P}(2\omega) = \frac{3m^2 Q^2 c^* c^2 N \omega^3 l^2 \bar{h}_{zz}^2}{32\pi e^2} \text{ эрг/с,} \quad /4/$$

где m - масса электрона; Q - электрическая добротность сверхпроводящего резонатора в СВЧ диапазоне; c^* - эффективная электрическая емкость резонатора; l - полуввысота резонатора; \bar{h}_{zz} - амплитуда гравитационной волны из выражения /3/; N - число секций резонатора.

Принимая параметры приемного резонатора следующими: $l=3$ см; $N=30$; $c^*=10^2$ см; $Q=10^{11}$ на частоте $\omega=2 \cdot 10^{11}$ рад/с и амплитуду гравитационной волны $\bar{h}_{zz}=1,4 \cdot 10^{-29}$ соответствующей гравитационному потоку интенсивности 30 эрг/с, получим $\mathcal{P}(2\omega) \approx 2 \cdot 10^{-15}$ эрг/с. Если резонатор охладить до температуры 1 К, то мощность равновесного излучения в нем на частоте $\omega=2 \cdot 10^{11}$ рад/с составит 10^{-15} эрг/см³с. Поэтому полезный электромагнитный сигнал по мощности $\sim 2 \cdot 10^{-15}$ эрг/с может быть легко зарегистрирован с помощью синхронного СВЧ детектора.

Из выполненного анализа следует, что постановка полного лабораторного гравиволнового эксперимента в настоящее время не сопряжена с преодолением принципиальных трудностей. Реализация такого опыта - дело сегодняшнего дня.

В заключение авторы выносят глубокую благодарность академику Н.Н.Боголюбову за ценные советы и постоянную поддержку данного направления исследований и профессору Н.А.Черникову за плодотворные обсуждения рассмотренной проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kafka P., Schnupp L. Astron.Astrof., 1978, v.70, p.97.