

- [3] M.Aderholz, L.Bondár, W.Braunec et. al. Proc. of the Sienna Int. Conf. on Elementary Particles, 1, 75, 1963.
- [4] M.Aderholz, J.Bartsch, L.Bondár et. al. Nuovo Cim., 34, 495, 1964.
- [5] M.Aderholz, L.Bondár, M.Deutschmann et. al. Nuovo Cim., 35, 659, 1965.
- [6] K.Gottfried, J.D.Jackson. Nuovo Cim., 33, 309, 1964.
- [7] К.А.Тер-Мартirosян. ЯФ; 4, 1067, 1966.
- [8] M.Barmawi. Phys. Rev. Lett., 16, 595, 1966.
- [9] L.Stodolsky, J.J.Sakurai. Phys. Rev. Lett., 11, 90, 1963.
- [10] D.P.Roy. Nuovo Cim., 40, A513, 1965.
- [11] M.Abolins, D.D.Carmony, Duong-N Hoa et. al. Phys. Rev., 136, B195, 1963.

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ И ОБНАРУЖЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

В.Б.Брагинский, М.Е.Герценштейн

Недавно вновь был поднят вопрос об эффективности генерации гравитационных волн электромагнитным полем [1]. Источником гравитационных волн является в [1] тензор энергии -импульса, квадратичный по электромагнитному полю. Математически эта задача эквивалентна преобразованию света в квадратичной нелинейной среде и к ней применимы все выводы нелинейной оптики [2,3]. Для эффективного преобразования необходимо выполнение условий синхронизма и поляризационных соотношений во всем пространстве взаимодействия. В [1] эти условия не выполнены, и поэтому полученный коэффициент преобразования η_w на много порядков ниже синхронного η_0 .

Условие синхронизма выполняется при движении электромагнитной волны в постоянном магнитном поле H_0 (волновой резонанс [4]). Для коэффициентов преобразования с точностью до множителя порядка единицы имеем:

$$\eta_w \approx \frac{\gamma}{c^5} \frac{H_w^2 V}{T_w}, \quad [1] \quad (1)$$

$$\eta_0 \approx \frac{\gamma}{c^4} H_0^2 L^2 = \frac{\gamma H_0^2 T_0^2}{c^2}; \quad T_0 = \frac{L}{c}, \quad [4] \quad (2)$$

где γ – гравитационная постоянная, H_w – поле электромагнитной волны, V – объем, занимаемый волной, T_w – длительность импульса волны, T_0 – время взаимодействия.

Отношение η_w/η_0 равно

$$\frac{\eta_w}{\eta_0} = \left(\frac{H_w}{H_0} \right)^2 \cdot \frac{c^3 T_0^2 T_w}{V} \quad (3)$$

Первый множитель в (3) равен отношению энергий переменного и постоянного полей, второй связан с несинхронностью [4]. Отметим, что мал не только второй, но и первый множители. Например, при $H_0 = 10^4 \text{ э}$ (постоянный магнит) отношение $H_w/H_0 = 1$ при мощности электромагнитной волны $\sim 7 \cdot 10^{10} \text{ см/см}^2$, которая может быть получена только в фокусе мощного лазера.

В лабораторных условиях можно ожидать примерно следующих значений η_0 и η_w для гигантского импульса лазера ($\epsilon = 10^8 \text{ эрг}$, $T_w = 10^{-9} \text{ сек}$) $\eta_w = 10^{-43}$, если же имеется волновой резонанс и $H_0 = 10^5 \text{ э}$, и $L = 10^3 \text{ см}$, то $\eta_0 = 10^{-33}$; для импульсного магнитного поля $H_0 = 3 \cdot 10^7 \text{ э}$ [5], при $L = 10^3 \text{ см}$ $\eta_0 = 10^{-28}$. Несмотря на то что приведенные оценки η_0 существенно выше оценок η_w приведенных в [1], по-видимому, в лабораторных условиях генерация гравитационных

волн такими методами малоперспективна. При распространении света в межзвездных полях $\eta_0 \sim 10^{-17}$ [4]; при диффузии излучения внутри звезд можно использовать (2), полагая L порядка радиуса звезды, это может дать $\eta_0 \sim 10^{-18} - 10^{-25}$ в зависимости от величины магнитного поля. В коллапсирующих звездах магнитные поля могут быть весьма большими [6] и η_0 больше чем 10^{-18} .

Рассмотрим другой участок спектра – малые частоты, к которым результаты [1] вообще не применимы. Гравитационное излучение движущихся тел (например, двойных звезд) может быть существенным в балансе энергии [7, 8] и даже качественно изменять характер движения.

Излучение гравитационных волн низких частот (например от близких двойных звезд) может быть обнаружено по относительному изменению скорости свободных нерелятивистских тел [8,9], что можно осуществить используя радио (или оптические) интерферометры. Амплитуда периодической компоненты относительной скорости Δv двух свободных тел*, вызванная гравитационной волной равна [7].

$$\Delta v = l \sqrt{\frac{8 \pi \gamma t}{c^3}}, \quad (4)$$

где l – среднее расстояние между телами, t – плотность потока энергии волны. Для двух гелиоцентрических станций, находящихся на расстоянии 100 млн.км гравитационное излучение звезды i Bootes ($t = 1 \cdot 10^{-10} \text{ эрг/сек см}^2$) создаст в соответствии с (4) амплитуду периодического изменения относительной скорости $\Delta v = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ см/сек}$. В лабораторных условиях для двух близко расположенных тел измерить такие относительные скорости нетрудно. Существенно более сложная задача – измерение периодических компонент относительных скоростей далеко разнесенных тел.

Отметим, что уже имеющаяся методика измерения скоростей спутников на таких расстояниях позволяет измерять относительные скорости

с метрологической точностью порядка $0,1 \text{ см/сек}$ (см., например, данные "Маринер-IV" [10, 11]).

Так как точность измерения узкополосного сигнала (каким например является гравитационное излучение двойных звезд) обычно на шесть – семь порядков по амплитуде больше, чем точность абсолютных (метрологических) измерений той же величины, то уже сейчас при достигнутой разрешающей способности можно было бы измерять потоки гравитационного излучения на уровне $10^{-2} \div 10^{-4} \text{ эрг/сек.см}^2$. По-видимому, нет оснований считать достигнутую точность относительных изменений скоростей предельной.

В заключение следует отметить, что пессимистическая оценка проблемы экспериментального обнаружения гравитационного излучения, высказанная П.Дж.Вестервелтом [1], не имеет достаточных оснований. Представляет несомненный интерес предварительная теоретическая оценка той астрофизической информации, которая может быть получена при обнаружении гравитационного излучения низких частот.

Физический факультет
Московского государственного университета
им. М.В.Ломоносова

Поступило в редакцию
22 февраля 1967 г.

Литература

- [1] П.Дж.Вестервелт. Письма ЖЭТФ, 4, 333, 1966.
- [2] N.Bloombergen. Нелинейная оптика. Изд-во "Мир", 1966.
- [3] С.А.Ахманов, Р.В.Хохлов. Проблемы нелинейной оптики: ВИНТИ, 1964.
- [4] М.Е.Герценштейн. ЖЭТФ, 41, 113, 1961.
- [5] А.Д.Сахаров. УФН, 88, 4, 725, 1966.
- [6] Я.Б.Зельдович, И.Д.Новиков. УФН, 87, 3, 447, 1965.
- [7] В.Б.Брагинский. УФН, 86, 433, 1965.
- [8] R.Kraft, J.Mathews, J.Greenstein. Astro. Phys. J., 136, 312, 1961.
- [9] М.Е.Герценштейн, В.И.Пустовойт. ЖЭТФ, 43, 605, 1962.52.
- [10] Der Wissenschaftlichen Gesellschaft der Luft und Raumfahrt, Braunschweig, 406-407, 1963.
- [11] AIAA, III meeting, reports, Jan. 1966.

* Две гелиоцентрических спутника можно считать свободными, если частота гравитационного излучения много больше частоты обращения по орбите.