Существование предела скорости при движении в газе и жидкости

Якубовский Е.Г.
e-mail yakubovski@rambler.ru

Аннотация

Преобразование Лоренца получено из свойств частиц вакуума см. [2], образующих метрический интервал СТО. При этом частицы вакуума образуют метрический тензор ОТО со скоростью возмущения, равной скорости света. Совершенно аналогично элементарные частицы образуют метрический тензор, скоростью возмущения которого являются звуковые волны. В газе и жидкости тоже имеется метрический интервал, образованный звуковыми волнами и метрическим тензором звуковых волн. Если электромагнитные волны образованы частицами вакуума, то звуковые волны образованны элементарными частицами. Преобразование Лоренца со скоростью света определяет свойства пространства-времени для микрочастиц, имеющих массу меньше массы Планка в инерциальной системе координат. Преобразование Лоренца со скоростью звука определяет свойства пространства-времени для макротел, имеющих массу больше массы Планка в инерциальной системе координат. Причем в вакууме эти оба преобразования совпадают. Предложена формула, определяющая свойство пространства для произвольной массы. Получается, что свойства пространства-времени зависят от массы системы и скорости двигающегося объекта. Причем образующие тело частицы пересчитываются в другую инерциальную систему координат с помощью преобразования Лоренца с фазовой скоростью см. [1], очень мало отличающегося от преобразования Галилея, так как максимальная скорость сравнима со скоростью звука. При малой скорости частиц тела справедливо понятие центра массы. Кроме того, имеется пересчет с помощью преобразования Лоренца со скоростью звука, при которой значение центра массы скорости и ускорения разные. Но имеются и отличия. Если частицы

вакуума образуют разреженный газ - вакуум, элементарные частицы, электромагнитное и гравитационное поле см. [2], то элементарные частицы образуют жидкости и газы. Причем в жидкостях и газах образуется взаимодействие материальных тел, как и частицы вакуума образуют взаимодействие элементарных частиц, приводя к закону Шредингера, Дирака, уравнениям Максвелла и ОТО. Свойства газов, образованных элементарными частицами аналогичны свойствам разряженной среды – вакуума, заполненного частицами вакуума см. [2]. Причем частицы вакуума описываются уравнением Навье – Стокса, образуя элементарные частицы, описываемые уравнением Шредингера. Имеется непосредственная связь между скоростью частиц вакуума и волновой функцией элементарных частиц см. [2]. Аналогично и элементарные частицы, образующие жидкости и газы вызывают квантовые свойства этих тел. Так спиновая детонация это проявление квантовых свойств турбулентных газов см. [5].

Влияние среды определяет силы, действующие на тело, как в случае частиц вакуума, так и в случае элементарных частиц. Кроме этого среда определяет релятивистский знаменатель со скоростью звука, вместо скорости света. В случае частиц вакуума, определяются электромагнитные волны, а в случае элементарных частиц, определяются звуковые волны. Предлагается описывать движение в жидкости и газе с помощью метрического интервала звуковых волн. При этом в материальных средах скорость движения ограничена скоростью, сравнимой со скорость звука. В данной статье объяснен этот факт.

Метрический интервал и метрический тензор в жидкостях и газе запишется в виде

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \sum_{k=1}^{3} (dx^k)^2 .$$

Где c скорость передачи возмущения, метрический интервал Минковского.

При этом в качестве переносчиков энергии в звуковой волне используются элементарные частицы, а не частицы вакуума. В случае электромагнитной волны нужно использовать в преобразовании Лоренца фазовую скорость см. [1] и переносчиками волны являются частицы вакуума. В случае элементарных частиц фазовая скорость совпадает со скоростью света в вакууме и в преобразовании Лоренца нужно использовать скорость света в вакууме. В случае газа скорость звука превращается в константу, и пространство становится изотропным. При этом в отличии от вакуума и электромагнитных волн, скорость возмущения может быть комплексной, что приводит к преодолению звукового барьера.

При этом преобразование Лоренца будет иметь

$$dx^1 = \frac{dx'^1 + Vdt'}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}; dt = \frac{dt' + \frac{V}{c^2}dx'^1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, dx^2 = dx'^2, dx^3 = dx'^3.$$

Тогда метрический интервал сохраняется

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \sum_{i=1}^{3} (dx^i)^2$$

А уравнение движения твердого тела в жидкости и газе под действием силы не электромагнитного происхождения запишется в виде

$$\frac{d}{dt}\frac{mV_i}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} = F_i.$$

Причем при превышении скорости звука материальным телом возникает ударная волна в газе, которая обладает особыми свойствами. Причем переход через звуковую скорость возможен, так как скорость звука величина комплексная. При этом подкоренное выражение становится мнимым, и уравнение приобретает вид

$$\frac{d}{dt}\frac{m\mathbf{V}}{\sqrt{\alpha + i\delta}} = \frac{d}{dt}\frac{m\mathbf{V}(\sqrt{\sqrt{\alpha^2 + \delta^2} + \alpha} \pm i\sqrt{\sqrt{\alpha^2 + \delta^2} - \alpha})}{\sqrt{2(\alpha^2 + \delta^2)}} = \mathbf{F}.$$

Существует понятие центра скорости тела и центра ускорения тела. В релятивистском случае они не совпадают. Если бы не было квадратного корня в знаменателе, то результирующая сила тяги совпадала с центром ускорением тела и с центром скорости тела. При этом тело двигалось как единое целое. Но имеется знаменатель и результирующая сила не совпадает с центром скорости тела. Т.е. возникают дополнительные силы, и результирующая сила направлена на центр ускорения тела, а не на центр скорости тела. При этом происходит вращение и колебание конструкции, причем, так как имеется зависимость $\alpha(V)$, равнодействующая этих мнимых сил приложена к разным точкам. Нужно сконструировать самолет, чтобы максимум силы приходился на центр скорости самолета. Тогда самолет будет двигаться без вращения и пульсаций. Облегчает ситуацию тот факт, что в этих условиях модуль силы равен $\sqrt[4]{\alpha^2+\delta^2}F<F$, т.е. меньше силы тяги.

Но когда частота пульсаций, вызванная силой, не совпадающей с центром скорости, равна резонансной частоте, возникают растущие колебания тела, и разрушение тела. Не совпадения центра скорости и ускорения начнется вращение вокруг центра скорости и, следовательно, изменение угла атаки. Это может изменить действующие на тело силы и увеличит не совпадение центра скорости и ускорения. В случае резонанса этих колебаний возникнет разрушение самолета.

Докажем, что тело, имеющее малое сечение в трехмерном пространстве достигнет под действием силы постоянную скорость, большую чем комплексная скорость звука. В случае действительной скорости звука сингулярность не устранима. Но скорость звука величина комплексная, так как звук является затухающим в жидкости и газе. Электромагнитные волны в вакууме не затухают, поэтому имеется конечный предел скорости распространения.

Если рассмотреть одномерный случай, который соответствует телу, - двигающейся плоскости, то получим решение

$$\frac{V}{\sqrt{1-V^2/c^2}}=\int Fdt/m.$$

При этом скорость меняется по закону

$$\frac{V^2}{c^2}=\frac{(\int \frac{Fdt}{mc})^2}{1+(\int \frac{Fdt}{mc})^2}.$$

Предельным значением получим скорость звука c. Но если рассмотреть трехмерное пространство и узкое тело, то скорость и сила будет дельта функцией от поперечной координаты.

$$\frac{V^2\delta(r)}{c^2}=\frac{(\int \frac{Fdt}{mc})^2\delta(r)}{1+(\int \frac{Fdt}{mc})^2\delta(r)}=(\int \frac{Fdt}{mc})^2\delta(r).$$

В самом деле, имеем, используя аппроксимацию обобщенной функции

$$\frac{1}{1+(\int \frac{Fdt}{mc})^2\delta(r)}=\frac{1}{1+(\int \frac{Fdt}{mc})^2\frac{\exp(-x^2/2\sigma^2)}{\sigma\sqrt{2\pi}}}=\frac{\exp(x^2/2\sigma^2)\sigma\sqrt{2\pi}}{\exp(x^2/2\sigma^2)\sigma\sqrt{2\pi}+(\int \frac{Fdt}{mc})^2}=1.$$

Т.е. дробь оказывается равной единице, и обобщенная функция аппроксимируется как единица. При этом, начиная с момента, когда знаменатель станет наименьшим по модулю, сила превратится в мнимую. В самом деле, имеем при большой скорости уравнение

$$\frac{V}{\sqrt{V^2/c^2-1}}=\int Fdt/m$$

При этом скорость меняется по закону

$$\frac{V^2}{c^2}=\frac{(i\int \frac{Fdt}{mc})^2}{1+(i\int \frac{Fdt}{mc})^2}.$$

При этом для узкого тела скорость является комплексной

$$\frac{V}{c}=\int_0^{t_s}\frac{Fdt}{mc}+i\int_{t_s}^{\infty}\frac{Fdt}{mc}=1+i\int_{t_s}^{\infty}\frac{Fdt}{mc}$$

С одной стороны имеем на бесконечности времени скорость тела – плоскости равна скорости звука, а с другой стороны имеем значение скорости тела, бесконечно узкому в направлении движения, равной мнимой бесконечности. Значит, для конечного тела установится промежуточное комплексное значение скорости, по модулю большее скорости звука, с действительной частью, приближенно равной скорости звука. Это произойдет, так как сила станет комплексной. При этом преодоление барьера возможно за счет комплексной скорости звука. Для определения максимальной скорости тела в жидкости или газе, надо определить скорость возмущения в среде, когда звуковые волны не будут затухать. Т.е. определить скорость звука в не вязкой жидкой среде.

Но какова же эта максимальная скорость движения тела? Для звуковых волн имеем формулу дисперсии звука $k = \frac{\omega}{c_s} + i\alpha\omega^2$ см. [6]. Значит, комплексная скорость звука равна $c = \frac{1}{1/c_s + i\alpha\omega}$. При этом знаменатель в преобразовании Лоренца запишется в виде $\sqrt{1 - V^2(1/c_s^2 - \alpha^2\omega^2 + 2i\alpha\omega/c_s)}$. Уравнения движения Ньютона будут иметь вид

$$\int_{-\omega}^{\infty} \frac{d}{dt} \frac{mV_l}{\sqrt{1 - V^2(1/c_s^2 - \alpha^2\omega^2 + 2i\alpha\omega/c_s)}} \exp[-(\omega^2\alpha^2 c_s^2 + \frac{1}{\omega^2\alpha^2 c_s^2})/2] = \\ = \int_{-\omega}^{\infty} F_l \exp[-(\omega^2\alpha^2 c_s^2 + \frac{1}{\omega^2\alpha^2 c_s^2})/2].$$

Величина предельной скорости по порядку величины равна $V/c_s = 1/\sqrt{1 - \alpha^2\omega^2 c_s^2} = 1/\sqrt{1 - \nu^2/(c_s^2\lambda^2)} = 1/\sqrt{1 - \Lambda^2/9\lambda^2}$, где величины равны $\alpha = \frac{\nu}{c_s^3}, \omega = \frac{c_s}{\lambda}, \nu = c_s\Lambda/3$, ν кинематическая вязкость, λ длина звуковой волны, $\Lambda = 10^{-5} cm$ длина свободного пробега. Для существования звуковой волны, длина волны должна равняться примерно трем расстояниям между частицами, которое равно по порядку величины $10^{-6} cm$. Т.е. отношение $\Lambda^2/9\lambda^2 \le 1$. При усреднении мнимый линейный по частоте член равен нулю, так как наряду с комплексным членом имеется и комплексно сопряженный член. Численный расчет скорости тела, когда интеграл будет иметь максимум модуля при изменении скорости тела, определит максимальную скорость тела

$$\int_{-\omega}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{1-V^2(1/c_s^2-\alpha^2\omega^2+2i\alpha\omega/c_s)}} \exp[-(\omega^2\alpha^2 c_s^2+\frac{1}{\omega^2\alpha^2 c_s^2})/2]d\omega.$$

Т.е. скорость движения макротел ограничена условием максимума модуля интеграла. Максимум будет существовать, так как при увеличении от нулевой скорости к конечной интеграл будет расти. При бесконечной скорости имеем нулевой интеграл.

Совершенно аналогично определяем максимальную скорость в случае расходимости действительного интеграла в электромагнитном случае для заряженной частицы. При использовании сред с дисперсией, надо за скорость, подставляемую в преобразование Лоренца использовать фазовую скорость, которая в проводниках комплексная

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c_F^2}(1+\frac{4\pi\sigma i}{\omega})}} \exp[-(\omega^2(4\pi\sigma)^2+\frac{1}{(4\pi\sigma)^2\omega^2})/2]/$$

$$/\int_{-\infty}^{\infty} \exp[-(\omega^2(4\pi\sigma)^2+\frac{1}{(4\pi\sigma)^2\omega^2})/2] < \frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c_F^2}}}.$$

Причем фазовая скорость в каждой инерциальной системе координат своя, при этом фазовая скорость уменьшится.

В общем случае, скорость в преобразовании Лоренца с частицами малой массы и телами большой массы определяется по формуле

$$\frac{1}{c^2}=\frac{\gamma}{c_s^2(\alpha c_s)}+\frac{1-\gamma}{c_F^2}, \gamma=\frac{\exp(-m_{Pl}^2/m^2)}{\exp(-m^2/m_{Pl}^2)+\exp(-m_{Pl}^2/m^2)} \quad (1)$$

При этом существует максимальная скорость движения тела и частицы, равная максимальной скорости движения тела в вакууме. Причем эта максимальная скорость равна скорости света в вакууме. При этом скорость света и скорость звука в вакууме по порядку величины совпадают. Если взять объем вакуума, то в одном кубическом метре содержится малое количество частиц. Но если возмутить одну частицу, то в движение придут все частицы в силу электрического равновесия частиц до возмущения. В силу малой плотности вакуума возникшее давление в волне мало и определяется по формуле $\Delta p = \rho c u$. Где величина ρ это плотность вакуума, величина u - скорость возмущения, c - скорость звука. Причем окажется, что скорость звука в вакууме сравнима со скоростью света. Это произойдет в силу того, что частицы вакуума образуют элементарные частицы и электромагнитное поле см. [2] и механизм электромагнитных волн совпадает со скоростью звука, образованному частицами вакуума.

Но в чем разница между электромагнитными волнами и звуковыми волнами в вакууме? Разница в методе возбуждения. Образование электромагнитных волн связано с колебанием электронов, образующих колеблющийся ток, с большой скоростью электронов. Звуковые волны связаны с колебанием макротел, и как следствие малая скорость движения частиц, образующих звуковую волну. Но и электромагнитная волна, и звуковая волна это движение частиц вакуума с разной скоростью, при почти одинаковой скорости распространения. Но в звуковой волне частицы вакуума образуют элементарные частицы, которые колеблются с малой скоростью. В электромагнитной волне образования элементарных частиц нет. Но при высоких частотах образуется электрон-позитронная пара с большой скоростью.

При движении макротел в жидкости и газе уравнения движения запишутся в виде

$$\frac{d}{dt}\frac{mV_i}{\sqrt{1-V^2/c^2}} = F_i$$

При этом скорость возмущения среды определяется по формуле (1). Комплексная скорость означает вращение центра тяжести тела или его колебание с амплитудой, соответствующей мнимой части скорости см. [2].

Надо отметить, что также как элементарные частицы образуют квантовые состояния, обусловленные тем, что элементарные частицы состоят из частиц вакуума, материальные тела проявляют квантовые свойства, так как состоят из элементарных частиц. Докажем это.

Покажем, что можно определить напряженность электрического и магнитного поля у уравнений звуковых волн гидродинамики. Для этого определим понятие скалярного и векторного потенциала звукового поля. Ротор меняет знак при переходе из правой декартовой системы координат в левую. Это можно доказать расписав определение ротора в декартовой системе координат и поменяв знак в одном столбце у оператора дифференцирования и этой же компоненте скорости.

$$\nabla_l \times \mathbf{V} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & -\mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x_1} & -\frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ V_1 & -V_2 & V_3 \end{vmatrix} = -\begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ V_1 & V_2 & V_3 \end{vmatrix} = -\nabla_r \times \mathbf{V}$$

индекс r соответствует правой системе координат, индекс l левой. При этом дивергенция знак не меняет. Распишем величину комплексной скорости в виде

$$\mathbf{V} = (\mathbf{V} + \mathbf{V}^*)/2 + (\mathbf{V} - \mathbf{V}^*)/2,$$

и подействуем оператором дивергенция на обе части равенства

$$\nabla_r \mathbf{V} = \nabla_r (\mathbf{V} + \mathbf{V}^*)/2 + \nabla_r (\mathbf{V} - \mathbf{V}^*)/2.$$

Перейдем в комплексно сопряженное пространство и в плоскости векторов $\mathrm{Re}\,\mathbf{V}, \mathrm{Im}\,\mathbf{V}$ возьмем левую дивергенцию. При этом направление мнимой компоненты скорости совпадает с направлением оси, у которой меняем знак. При этом имеем соотношение $\nabla_r \mathbf{V} = \nabla_l \mathbf{V}^*$. Так как при этом в плоскости $\mathrm{Re}\,\mathbf{V}, \mathrm{Im}\,\mathbf{V}$ действительная часть не изменит знака, а мнимая часть изменит знак, получим

$$\begin{gathered} \nabla_r (\mathbf{V} + \mathbf{V}^*)/2 + \nabla_r (\mathbf{V} - \mathbf{V}^*)/2 = \nabla_r \mathbf{V} = \nabla_l \mathbf{V}^* = \\ = \nabla_l (\mathbf{V} + \mathbf{V}^*)/2 - \nabla_l (\mathbf{V} - \mathbf{V}^*)/2 = \nabla_r (\mathbf{V} + \mathbf{V}^*)/2 - \nabla_r (\mathbf{V} - \mathbf{V}^*)/2 \end{gathered}.$$

При этом воспользовались тем, что правая и левая дивергенция равны. Откуда получаем $\nabla_r(\mathbf{V}-\mathbf{V}^*)/2=0$, и значит, $(\mathbf{V}-\mathbf{V}^*)/2=i\cdot\nabla_r\times\mathbf{A}$, т.е. мнимая часть комплексной скорости соленоидальная.

Аналогично расписываем скорость, подействовав оператором ротор

$$\nabla_r\times\mathbf{V}=\nabla_r\times(\mathbf{V}+\mathbf{V}^*)/2+\nabla_r\times(\mathbf{V}-\mathbf{V}^*)/2,$$

но при этом величину скорости представим в виде $\mathbf{V}=\mathbf{V}_0+\frac{\partial\mathbf{A}}{c\partial t}$, где величина $\mathbf{A}$ действительна и удовлетворяет $\mathrm{div}\mathbf{A}=0$, а скорость c это скорость возмущения в среде. Значит из условия $\nabla_r\mathbf{V}=\nabla_r\mathbf{V}_0$, можно определить $\mathbf{V}=\mathbf{V}_0+\frac{\partial\mathbf{A}}{c\partial t}$. При этом условие на мнимую часть $\mathbf{V}$ выполняется. Перейдем в комплексно сопряженное пространство и в плоскости векторов $\mathrm{Re}\mathbf{V},\mathrm{Im}\mathbf{V}$ возьмем левый ротор, получим соотношение $\nabla_r\times\mathbf{V}=\nabla_l\times\mathbf{V}^*$. При этом направление мнимой компоненты скорости совпадает с направлением оси, у которой меняем знак. Так как при этом действительная часть изменит знак, а мнимая часть нет, ($\nabla_l\times=-\nabla_r\times$ и взята комплексно сопряженная часть), имеем

$$\begin{gathered}\nabla_r\times\mathbf{V}=\nabla_l\times\mathbf{V}^*=\nabla_l\times(\mathbf{V}+\mathbf{V}^*)/2-\nabla_l\times(\mathbf{V}-\mathbf{V}^*)/2=\\=-\nabla_r\times(\mathbf{V}+\mathbf{V}^*)/2+\nabla_r\times(\mathbf{V}-\mathbf{V}^*)/2\end{gathered}$$

т.е. получим $\nabla_r\times(\mathbf{V}+\mathbf{V}^*)=0$. Это соотношение эквивалентно $(\mathbf{V}+\mathbf{V}^*)/2=-\mathrm{grad}\varphi$. Итак, имеем

$$\begin{aligned}\mathbf{V}_0+\frac{\partial\mathbf{A}}{c\partial t}&=-\nabla\varphi+i\cdot\nabla\times\mathbf{A}\\\mathbf{V}_0^*+\frac{\partial\mathbf{A}}{c\partial t}&=-\nabla\varphi-i\cdot\nabla\times\mathbf{A}\end{aligned}.$$

Эта формула другая формулировка факта, что вектор можно представить в виде суммы градиентной части и соленоидальной части. При этом выбираем калибровку $\mathrm{div}\mathbf{A}=0$ см. [2]§2 для свободного пространства. При этом выполняется условие поперечности поля, $\varphi=0$. Из этого равенства имеем

Из этого равенства имеем

$$\begin{aligned}\mathbf{V}_0 &= -\frac{\partial \mathbf{A}}{c\partial t} + i\cdot\nabla\times\mathbf{A} = \mathrm{E} + i\mathrm{H} \\ \mathbf{V}_0^* &= -\frac{\partial \mathbf{A}}{c\partial t} - i\cdot\nabla\times\mathbf{A} = \mathrm{E} - i\mathrm{H}\end{aligned}.$$

Причем, так как скорость в газе подчиняется волновому уравнению, напряженность «электрического» и «магнитного» поля подчиняется волновому уравнению. Частным решением двух волновых уравнений являются уравнения Максвелла для свободного пространства. Эти частные решения являются и общими решениями для свободного пространства. В самом деле, добавка произвольной функции в уравнения Максвелла для свободного пространства, приведет к волновому уравнению с добавочными функциями относительно уравнения свободного пространства. Имея уравнения Максвелла для свободного пространства, окажемся в условиях [2]§2 и далее просто используем материал этого параграфа. Т.е. получаем, что из условия калибровки $\mathrm{div}\mathbf{A} = 0$ см. [3]§2 для свободного пространства выполняется условие поперечности поля $\varphi = 0$.

Согласно определению операторов «магнитного» и «электрического» поля имеем определение энергии поля

$$\widehat{H} = \frac{1}{8\pi}\int (\widehat{\mathbf{E}}^2 + \widehat{\mathbf{H}}^2) d^3x.$$

При этом вводя канонические переменные $P_{k\alpha}, Q_{k\alpha}$ см. [3]§2, получим

$$\widehat{H} = (\widehat{P}_{k\alpha}^2 + \omega^2 \widehat{Q}_{k\alpha}^2)/2.$$

Определение собственных значений этого оператора энергии не требует вычислений, так как сводится к известной задаче о собственных значениях линейного гармонического осциллятора см. [4]§23

$$E = mc^2 + i(N_{k\alpha} + 1/2)m\nu\omega.$$

Где величины c, ν это скорость звука и кинематическая вязкость среды. Если кинематическая вязкость вакуума величина мнимая и равна $i\hbar/(2m)$ см. [2], то кинематическая вязкость газов величина действительная, и, следовательно, собственная энергия гармонического осциллятора величина мнимая. Мнимость величины энергии означает колебание энергии с амплитудой, равной мнимой частью. При этом квантовое число $N_{k\alpha} < \frac{c^2}{\nu\omega} - \frac{1}{2}$.

Проявляется квантовая природа материальных тел и сред в теории спиновой детонации см. [5], которая происходит при высоких энергиях и является быстро протекающим, турбулентным явлением.

Выводы

Релятивистское уравнение движения проверенно при движении в ускорителях в условиях вакуума и имеет максимальную скорость, равную скорости света в вакууме. Причем в диэлектриках, скорость частицы ограничена фазовой скоростью. При этом фазовая скорость является комплексной. Но имеется максимальная скорость движения, равная скорости света в вакууме. В случае движения макротел в газе и жидкости возникают проблемы со сверхзвуковой скоростью, но так как скорость звука величина комплексная, ее можно преодолеть. Но для макротел тоже имеется предел скорости, больший, чем скорость звука в жидкости или газе. Все эти явление можно описать с помощью введения преобразования Лоренца со скоростью возмущения.

Литература

1. *Якубовский Е.Г.* Преобразование Лоренца в диэлектриках «Энциклопедический фонд России». 2015г., 10с., http://russika.ru/userfiles/390_1445577995.pdf
2. *Якубовский Е.Г.* ЧАСТИЦЫ ВАКУУМА, ОПИСЫВАЮЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ПОЛЯ. Реферативный журнал «Научное обозрение», 2016, №2, http://science-review.ru/abstract/pdf/2016/2/662.pdf
3. *Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Квантовая электродинамика, т.IV, М.,- «Наука»,1989 г., 727

4. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Квантовая механика Нерелятивистская теория т.III, Наука, М.,1969
5. Якубовский Е.Г. Описание спиновой детонации с помощью квантов звуковых волн, 2015, «Энциклопедический фонд России»,16стр. http://russika.ru/sa.php?s=1011
6. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика, т.VI, М.: Наука, 1988г., 736стр.