

## Излучение атома при движении, замедление хода часов в движущейся ИСО и эффект Доплера

А.К. Юхимец, к.т.н., доц. [anatoly.yuhimec@Gmail.com](mailto:anatoly.yuhimec@Gmail.com)

Рассмотрим излучение фотона атомом, движущимся в *абсолютном пространстве* (АП) со скоростью  $V$ . Но раньше мы должны показать, что излучение атома всегда происходит за счёт его массы покоя. Покажем это.

Действительно, атом, движущийся в АП, имеет кроме потенциальной кинетической энергии ещё и чисто внешнюю кинетическую энергию, за счёт которой он и имеет свой внешний импульс  $mV$ . Но этот импульс вместе с соответствующим количеством массы полностью или частично атом способен терять только при прямых взаимодействиях с другими телами. Если допустить, что атом способен излучать за счёт этой массы самопроизвольно, то тогда должна быть возможна следующая ситуация, условно изображённая на рис. 1.

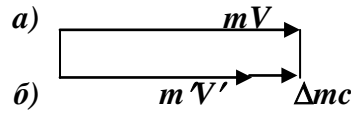


Рис. 1. Внешний импульс атома до (а) и после (б) излучения, а также импульс фотона.

Для изображённого случая мы должны записать следующие равенства:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-V^2/c^2}}, (1) \quad m' = \frac{m_0}{\sqrt{1-(V')^2/c^2}}, (2) \quad \Delta m = m - m', (3) \quad mV = m'V' + \Delta mc. (4)$$

Тогда из (4) следует, что  $\Delta m = \frac{mV - m'V'}{c}$ . А подставляя сюда  $m$  из (3), получим

$$\Delta m = \frac{m'V + \Delta mV - m'V'}{c}. \quad \text{Откуда} \quad \Delta m = m' \frac{V - V'}{c - V}. \quad (5)$$

Подставляя в (5) (1), (2) и (3), можно записать, что

$$\frac{m_0}{\sqrt{1-V^2/c^2}} - \frac{m_0}{\sqrt{1-(V')^2/c^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-(V')^2/c^2}} \left( \frac{V - V'}{c - V} \right), \quad \text{или упрощая}$$

$$\frac{\sqrt{1-(V')^2/c^2}}{\sqrt{1-V^2/c^2}} = \frac{\tilde{n} - V'}{c - V}. \quad \text{Дальнейшая цепочка преобразований такая. После}$$

возведения левой и правой частей в квадрат  $\frac{c^2 - V'^2}{c^2 - V^2} = \frac{(c - V')^2}{(c - V)^2}$ , или

$$\frac{(c - V')(c + V')}{(c - V)(c + V)} = \frac{(c - V')^2}{(c - V)^2}, \quad \text{или} \quad \frac{c + V'}{c + V} = \frac{c - V'}{c - V}, \quad \text{или}$$

$$c^2 + cV' - cV - VV' = c^2 - cV' + cV - VV', \quad \text{или} \quad 2\tilde{n}V' = 2cV. \quad \text{Откуда} \quad V' = V.$$

И тогда  $m' = m$ , а  $\Delta m = 0$ . Это и означает, что излучения за счёт внешней кинетической энергии не происходит.

Теперь мы можем вернуться к рассмотрению вопроса излучения атомом, движущимся в АП со скоростью  $V$ .

Если атом излучает под прямым углом к направлению своего движения, то соответствующие этому случаю импульсные диаграммы изображены на рис. 2.

Атом вначале за счёт своей массы покоя излучает фотон с массой  $\Delta m_0$ . Но так как фотон тут же взаимодействует с самим атомом, то его масса уменьшается и

становится  $\Delta m$ . Масса атома после излучения  $m'$  и его скорость  $V'$ . Для наглядности вектор  $m'V'$  отклонён от вектора  $mV$ , хотя реально он практически не отклоняется из-за несоизмеримо большей массы атома в сравнении с излучаемым фотоном.

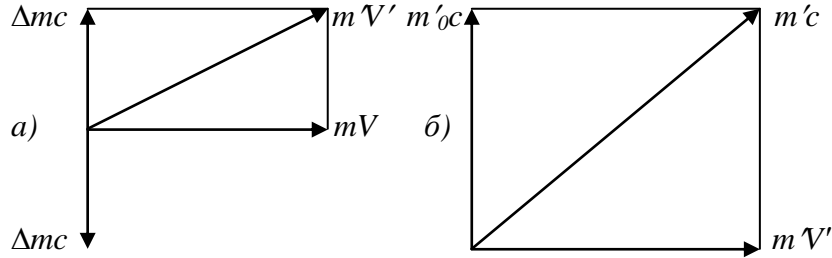


Рис. 2. Импульсные диаграммы атома, излучающего под прямым углом к направлению своего движения: а) диаграмма внешних импульсов; б) импульсная диаграмма атома в целом после излучения.

В этом случае можем записать следующие равенства:

масса покоя атома после излучения  $m'_o = m_o - \Delta m_o$ ;

полная масса атома после излучения  $m' = m - \Delta m$ ;

квадрат внешнего импульса атома после излучения  $(m'V')^2 = (mV)^2 + (\Delta mc)^2$ ;

соотношение (1) для атома после излучения  $(m'_o c)^2 + (m'V')^2 = (m'c)^2$ .

Подставляя все значения в последнее уравнение и разрешив его относительно массы излучаемого фотона, с учётом зависимости массы  $m$  от  $m_o$  и её скорости, получим:  $\Delta m = \Delta m_o (1 - \Delta m_o / 2m_o) \sqrt{1 - V^2 / c^2}$ . Соответственно, для частоты излучённого фотона с учётом (2) получим:  $\nu = \nu_o (1 - \Delta m_o / 2m_o) \sqrt{1 - V^2 / c^2}$ .

Практически всегда множитель в скобках можно считать равным единице. Тогда собственная частота излучения движущегося атома будет:

$$\nu'_o = \nu_o \sqrt{1 - V^2 / c^2}. \quad (6)$$

Рассмотрим излучение фотона атомом в направлении скорости своего движения в АП. Соответствующие этому случаю импульсные диаграммы изображены на рис. 3.

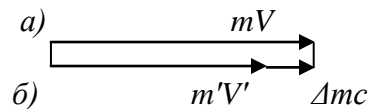


Рис. 3. Внешний импульс атома до излучения (а) и после излучения (б), а также импульс фотона. Полная импульсная диаграмма атома после излучения такая же, как и в предыдущем случае.

Для этого случая, аналогично предыдущему, можем записать следующие равенства:

масса покоя атома после излучения  $m'_o = m_o - \Delta m_o$ ;

полная масса атома после излучения  $m' = m - \Delta m$ ;

внешний импульс атома после излучения  $m'V' = mV - \Delta mc$ ;

соотношение (1) для атома после излучения  $(m'_o c)^2 + (m'V')^2 = (m'c)^2$ .

Подставляя всё в последнее уравнение, с учётом зависимости массы  $m$  от её массы покоя и скорости, вначале получим:  $\Delta m = \Delta m_0 \left(1 - \Delta m_0 / 2m_0\right) \frac{\sqrt{1 - V^2 / c^2}}{1 - V/c}$ .

А, в конечном счёте, частота излучения определится как:  $\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - V^2 / c^2}}{1 - V/c}$ .

Если же атом излучает в направлении, противоположном направлению своего движения, то частота излучения будет:  $\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - V^2 / c^2}}{1 + V/c}$ .

В общем же случае частоту излучения движущегося в АП источника можно выразить формулой: 
$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - V^2 / c^2}}{1 - \frac{V}{c} \cos \alpha}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – угол между направлением движения источника и направлением излучения.

Как видно из последней формулы, частота волнового процесса, связанного с излучением фотонов движущимся в АП источником, зависит от направления излучения в соответствии с классическим принципом Доплера, но отличается от последнего постоянным множителем  $\sqrt{1 - V^2 / c^2}$ . И мы видим, что собственная частота излучения атома при его движении в АП уменьшилась ровно настолько, насколько замедляется «время» в условно движущейся ИСО в трактовке СТО Эйнштейном.

Так как частота эталона времени в движущейся *инерциальной системе отсчёта* (ИСО) замедляется *точно так же*, частота излучения от покоящегося в ней источника будет оценена в самой ИСО *точно такой же*, какой она будет в случае излучения атомом, покоящимся в АП. Другими словами, если в абсолютно движущейся ИСО при разметке её *«особого физического времени»* (выражение Эйнштейна) мы используем её изменившийся *объективно реально* эталон времени, то при этом в системе соблюдается ПО. В этом смысле можно считать, что в движущейся ИСО замедляется не только ход её часов, но и течение самого времени, если мы измеряем его *по одним и тем же часам* в ИСО.

Таким образом, мы показали, что *ход современных эталонных часов* в движущейся ИСО *изменяется объективно реально (замедляется)* и зависит от *собственной (иначе, абсолютной) скорости* движения ИСО в *реальном физическом пространстве*.

В настоящее время, как известно, в качестве эталона времени принята секунда – единица времени, равная по длительности 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия. Атомы являются практически *идеальными часами*, а все остальные часы сверяются с частотой их (атомов) излучения.

Теперь рассмотрим до конца вопрос, связанный с *проявлением* релятивистского эффекта Доплера в разных случаях движения источника и приёмника света.

Итак, полученная выше формула (7) даёт нам частоту света, которая будет воспринята неподвижным в АП наблюдателем от движущегося источника в зависимости от направления излучения, а следовательно и наблюдения. Но если источник света неподвижен в АП, а приёмник, воспринимающий свет, движется

со скоростью  $V$ , то частота воспринимаемого света  $\nu'$  также будет зависеть от угла между направлением движения и направлением наблюдения. Кроме этого, частота воспринимаемого излучения возрастёт в связи с тем, что *собственное «время»* в движущейся системе отсчёта *замедлено*. В общем случае частоту  $\nu'$ , воспринимаемую движущимся в АП приёмником от неподвижного источника, излучающего с частотой  $\nu_0$ , можно выразить формулой

$$\nu' = \nu_0 \frac{1 + \frac{V}{c} \cos \alpha}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad (8)$$

где  $\alpha$  - угол между направлением движения приёмника и направлением от приёмника на источник света.

Если приёмник движется прямо на источник света, то есть угол  $\alpha = 0$ , то формула (7) примет вид  $\nu' = \nu_0 \frac{1 + V/c}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + V/c}{1 - V/c}}$ .

С другой стороны, если источник света движется в АП прямо на неподвижный приёмник, то, возвращаясь к формуле (7), частоту воспринимаемого приёмником света можно выразить как

$$\nu' = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - V/c} = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + V/c}{1 - V/c}}. \text{ И мы видим, что оба выражения совпадают,}$$

то есть частота воспринимаемого приёмником света *не зависит* от того движется ли источник прямо на приёмник, или движется приёмник прямо на источник.

Легко также показать, что одинаковым будет выражение для воспринимаемой частоты и в том случае, когда *источник удаляется* от неподвижного в АП приёмника, или наоборот, когда *приёмник удаляется* от неподвижного в АП источника по связывающей их прямой. Выражение примет вид  $\nu' = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - V/c}{1 + V/c}}$ .

Если неподвижный в АП приёмник принимает свет от движущегося источника под углом  $90^\circ$  к направлению движения, то, как мы уже показали выше (см. формулу (6)), частота воспринимаемого света будет  $\nu'_0 = \nu_0 \sqrt{1 - V^2/c^2}$ . Этот же результат следует и из формулы (7). К эффекту Доплера он никакого отношения не имеет, так как связан лишь с уменьшением собственной частоты источника. А то, что действительно *можно назвать* поперечным эффектом Доплера проявляется тогда, когда движущийся в АП приёмник воспринимает излучение, идущее от неподвижного в АП источника перпендикулярно направлению своего движения. Тогда из формулы (8) следует, что

$$\nu' = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (9)$$

И сразу *может показаться*, что это различие результатов говорит о неполной обратимости взаимных оценок в рассматриваемых двух случаях, и что его можно использовать для выявления абсолютного движения в АП. Но это не так.

Рассмотрим более внимательно последний случай. Когда в какой-либо ИСО, движущейся в АСО со скоростью  $V$ , наблюдают или воспринимают излучение от неподвижного источника перпендикулярно направлению движения ИСО, то фактически излучение в АСО направлено не перпендикулярно, а под углом  $\alpha = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{V}{c}$  к направлению движения приёмника (см. рис. 4). То есть,

воспринимаемое приёмником излучение должно иметь в АСО такое направление, чтобы проекция его скорости  $c$  на направление движения ИСО равнялась бы  $V$ . Тогда по отношению к ИСО излучение будет поступать перпендикулярно к направлению её движения.

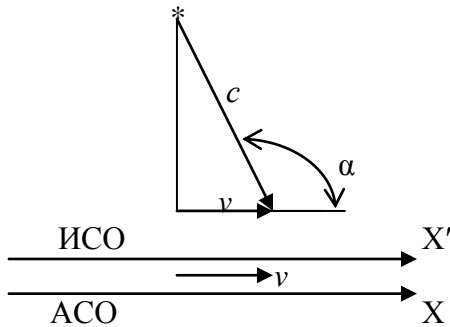


Рис. 4. Из АСО видно, что излучение от неподвижного в АП источника, воспринимаемое в ИСО перпендикулярно к её оси  $X'$ , фактически в АП движется к ней под углом  $\alpha$ .

В этом случае формула (8) даёт

$$v' = v_0 \frac{1 + \frac{V}{c} \cos \alpha}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} = v_0 \frac{1 - V^2/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} = v_0 \sqrt{1 - V^2/c^2}, \text{ то есть точно такой же}$$

результат, как и по формуле (6).

Чтобы в ИСО принимать излучение, идущее действительно по нормали к направлению ее движения, приёмник в ИСО следует направить под углом  $\alpha = \arctg \frac{c}{V}$  к этому направлению (см. рис. 5).

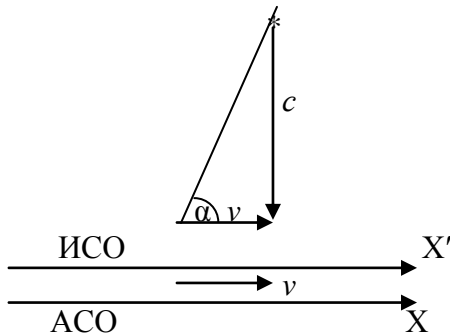


Рис. 5. Из АСО видно, что если мы хотим воспринимать в ИСО излучение от неподвижного в АП источника действительно под прямым углом к направлению её движения, то должны наблюдать его под углом  $\alpha$ .

В этом случае приёмник воспринимает излучение с частотой согласно формуле (9). При этом следует отметить, что указанный угол  $\alpha$  определён в АСО. В самой ИСО он будет оценен как  $\alpha' = \arccos \frac{V}{c}$ , так как с точки зрения ИСО картина приёма излучения выглядит так, как показано на рис. 6.

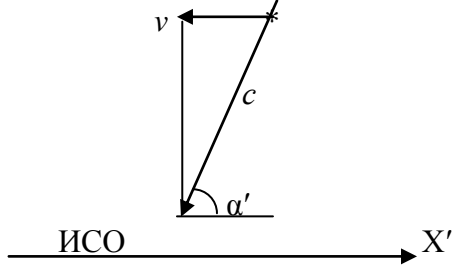


Рис. 6. Излучение от *неподвижного* в АП источника в ИСО наблюдается под углом  $\alpha'$ . При этом источник воспринимается как движущийся.

С другой стороны, если действительно в АСО принимать излучение от *движущегося* в АП источника так, как показано на рис. 6, то частота воспринятого света согласно формуле (7) будет

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - \frac{V}{c} \cos \alpha'} = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - V^2/c^2} = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}. \quad \text{То есть, частота будет}$$

воспринята точно такой же, как и по формуле (9).

Таким образом, мы видим, что и в этом случае измерения полностью обратимы.

Рассмотрим ещё раз случай, когда свет излучается и воспринимается в какой-либо ИСО. Допустим, что ИСО движется в АП со скоростью  $V$  в направлении своей оси  $x$ -ов. На этой оси и расположены неподвижно источник и приёмник света. Пусть источник излучает свет в направлении своего абсолютного движения. Тогда в соответствии с формулой (7) в АСО свет будет иметь частоту

$$\nu' = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - V/c}. \quad (10)$$

Но так как приёмник в АСО движется и свет догоняет его по прямой, то воспринимаемая частота в соответствии с формулой (8) с учётом (10) определится

$$\text{как } \nu'' = \nu' \frac{1 - V/c}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2} (1 - V/c)}{(1 - V/c) \sqrt{1 - V^2/c^2}} = \nu_0. \quad \text{Такой же будет воспринятая}$$

частота и при любом другом взаимном расположении неподвижных в ИСО источника и приёмника света. Только всякий раз, когда в АП в своём самостоятельном существовании свет идёт от источника к приёмнику не по направлению их общего движения, а под некоторым углом к нему, следует иметь в виду, что значение этого угла в АСО и в ИСО будет различным, как это уже и было показано выше.

Таким образом, для наблюдателей в любой ИСО собственная частота излучения  $\nu_0$  во всех направлениях остаётся точно такой же, как и для наблюдателей в АСО.

И, наконец, допустим, что в самой движущейся ИСО источник света движется вдоль оси  $x$ -ов со скоростью  $u'$ , имея абсолютную скорость движения в АП равную  $u$ . Найдём, какой будет частота света, воспринимаемая наблюдателями в ИСО под разными углами к направлению скорости  $u'$ .

Если приёмник излучения расположен на оси  $x$ -ов и источник приближается к нему, то частота воспринимаемого света определится следующим образом.

Так как источник излучения движется в АП со скоростью  $u$ , то частота излучения в АСО вдоль оси  $x$ -ов в соответствии с формулой (7) составит

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1-u^2/c^2}}{1-u/c} = \nu_0 \sqrt{\frac{1+u/c}{1-u/c}}. \quad (11)$$

Приёмник движется в АСО со скоростью  $V$ . Значит, по формуле (8) частота воспринимаемого неподвижным в ИСО приёмником света с учетом (11) и того, что по формуле сложения скоростей  $u' = \frac{u-V}{1-uV/c^2}$ , будет:

$$\nu' = \nu \frac{1-V/c}{\sqrt{1-V^2/c^2}} = \nu_0 \sqrt{\frac{(1-V/c)(1+u/c)}{(1+V/c)(1-u/c)}} = \nu_0 \sqrt{\frac{1+\frac{u-V}{c^2(1-uV/c^2)}}{1-\frac{u-V}{c^2(1-uV/c^2)}}} = \nu_0 \sqrt{\frac{1+u'/c}{1-u'/c}}.$$

Если же источник удаляется от приёмника, то проделанные аналогичным образом расчёты для воспринимаемой в ИСО приёмником частоты дают выражение  $\nu' = \nu_0 \sqrt{\frac{1-u'/c}{1+u'/c}}$ . Если приёмник принимает от движущегося источника излучение, направленное по нормали к оси  $x$ -ов, то частота воспринимаемого излучения будет

$\nu' = \nu_0 \sqrt{1-u'^2/c^2}$ . Данный случай впервые был подтверждён экспериментально в 1938 г. Айвсом и Стилуэллом в опытах с каналовыми лучами атомов водорода, двигавшимися со скоростью порядка  $10^8$  см/с и был назван поперечным эффектом Доплера. Название неудачное, так как именно сугубо волновой эффект Доплера *поперечным быть не может*.

Все три последних выражения для  $\nu'$  обобщаются формулой  $\nu' = \nu_0 \frac{\sqrt{1-u'^2/c^2}}{1-\frac{u'}{c} \cos \alpha}$ , которая аналогична формуле (7) с той лишь разницей, что в

ней взята скорость  $u'$ -скорость движения источника излучения, определённая в ИСО, и  $\alpha$ - угол между направлением движения источника и направлением излучения, также определённый в ИСО.

Если в ИСО движется не источник, а приёмник излучения, то в общем случае воспринимаемая им частота определится по формуле  $\nu' = \nu_0 \frac{1+\frac{u'}{c} \cos \alpha}{\sqrt{1-u'^2/c^2}}$ , где  $u'$ - скорость движения приёмника излучения, определённая в ИСО, а  $\alpha$ - угол в ИСО между направлением движения приёмника и направлением от приёмника на источник. Данная формула аналогична формуле (8). И мы ещё раз убеждаемся в том, что в движущейся ИСО все явления описываются и численно оцениваются точно так же, как и в АСО в их самостоятельном существовании.

Внимательный читатель очевидно уже отметил, что выше в наших расчётах частоты излучения, как от неподвижного источника, так и от движущегося, мы находили вначале величину массы излучаемого фотона, а потом переводили её по формуле Эйнштейна в его частоту. То есть *оба расчёта*, как в корпускулярной форме, так и в волновой форме *идентичны*. И мы видим, что эффект Доплера, *считающийся* чисто волновым, имеет и чисто *корпускулярное объяснение*.