

Задача о недогадливых пришельцах, или популярное изложение поперечного эффекта Доплера.

Вадим Матвеев¹, Олег Матвеев²

© 1-Jun-2016

Абстракт.

В статье рассматривается зависимость результатов наблюдения поперечного эффекта Доплера от приписанной себе наблюдателем относительной скорости.

Keywords: special relativity, transverse Doppler effect, aberration of light, blueshift, redshift

В популярной онлайн энциклопедии Wikipedia есть статья, посвященная релятивистскому эффекту Доплера. В статье есть раздел, рассматривающий поперечный эффект Доплера. В этом разделе утверждается следующее:

The transverse Doppler effect is the nominal redshift or blueshift predicted by special relativity that occurs when the emitter and receiver are at the point of closest approach. Light emitted at this instant will be redshifted. Light received at this instant will be blueshifted.

Classical theory does not make a specific prediction for either of these two cases, as the shift depends on the motions relative to the medium.

Читатель, ознакомившийся с этой заметкой, может задаться вопросом – так какое же из этих наблюдений является истинным либо как правильно интерпретировать различные результаты? Судя по всему, таким вопросом также задаются даже специалисты, о чем свидетельствует серия относительно недавних публикаций [1] – [4] .

В качестве примера можно привести задачу о Джо и пришельцах, размещенную на одном популярном веб-сайте.

<http://spiff.rit.edu/classes/phys200/lectures/doppler/doppler.html>

Q: Joe has an ordinary red laser pointer which emits red light, with a wavelength of about 650 nm. He points the laser directly up into the night sky.

Aliens flying past the Earth at $v = 0.9c$ look straight down at Joe and his laser.

¹ matwad@mail.ru

² oleg@tdd.it

What wavelength do they measure?

Очевидно, по замыслу автора, пришельцы должны увидеть сдвиг излучения, которое испускает лазерная указка Джо в длинноволновую область спектра (redshift), что свидетельствует о замедлении часов Джо.

Правильное решение однако состоит в том, то пришельцы вообще не смогут измерить частоту, поскольку и Джо и пришельцы приписывают себе состояние покоя одновременно.

Наверное, у пришельцев был их собственный Эйнштейн, если они не догадались учесть абберацию и направить свой взгляд вперед по ходу движения на угол, который соответствует приписанной им в задаче относительной скорости.

В настоящей статье мы разбираем результаты наблюдений поперечного эффекта Доплера (Transverse Doppler Shift) и утверждаем, что релятивистский наблюдатель и источник могут приписать себе любые скорости (в произвольно выбранной инерциальной системе отсчета), релятивистская сумма которых равна их скорости друг относительно друга.

Например, релятивистский наблюдатель может приписать себе состояние собственного покоя ($V_0=0$). Тогда источник излучения движется в системе отсчета наблюдателя, и наблюдатель фиксирует сдвиг излучения в длинноволновую область спектра (redshift), что соответствует замедлению темпа хода движущихся в его системе отсчета часов [5].

Однако, релятивистский наблюдатель может приписать себе и состояние движения относительно покоящегося источника. В этом случае при наблюдении поперечного эффекта Доплера признавший факт своего движения наблюдатель зафиксирует сдвиг частоты полученного от покоящегося источника излучения не в длинноволновую область спектра, а в коротковолновую (blueshift). Результаты этих наблюдений движущийся наблюдатель объяснит замедлением его собственных часов, что в свою очередь приводит к видимому ускорению наблюдаемых им самим процессов.

Релятивистский наблюдатель может направить наблюдательный прибор вперед по направлению движения на любой произвольно выбранный угол φ . Регистрируя частоту излучения движущегося относительно него источника он может трактовать результаты наблюдения двояко. Если он приписывает себе состояние покоя, он может расценивать изменение измеренной частоты как следствие продольного релятивистского эффекта Доплера. Если он приписывает себе относительную скорость, которая с учетом абберации соответствует углу наклона измерительного прибора, наблюдатель может придти к выводу, что фотон пришел к нему по кратчайшему пути, и он наблюдает только поперечный эффект Доплера.

Рассмотрим движущихся друг относительно друга со скоростью V наблюдателей A и B . Наблюдатель A вооружен зеленой лампочкой, дающей зеленое монохроматическое излучение, а наблюдатель B наблюдательным прибором с детектором – назовем его тубусом.

Пусть зеленая лампочка наблюдателя A испускает рассеянный свет.

Допустим, наблюдатель B намерен измерить только поперечный эффект Доплера без продольной его составляющей. Таким образом он сможет установить, насколько замедлились часы движущегося относительно него источника. Для этого он проводит наблюдение в тот момент времени t , когда сигнал от наблюдателя A приходит к нему по кратчайшему пути.

В специальной теории относительности постулируется, что любой наблюдатель может приписать себе состояние покоя, поскольку оно ничем не отличается от состояния движения. Следуя этому положению, наблюдатель B направляет тубус перпендикулярно направлению своего движения (рис. 1) и наблюдает красный цвет лампочки, частота которого соответствует формуле для поперечного эффекта Доплера.

$$f_b = \frac{f_a}{\gamma} \quad (1)$$

Наблюдатель B решает, что поскольку он покоится, то наблюдатель A движется относительно него, отчего его (наблюдателя A) часы замедляются и частота испускаемого света сдвигается в длинноволновую область спектра.

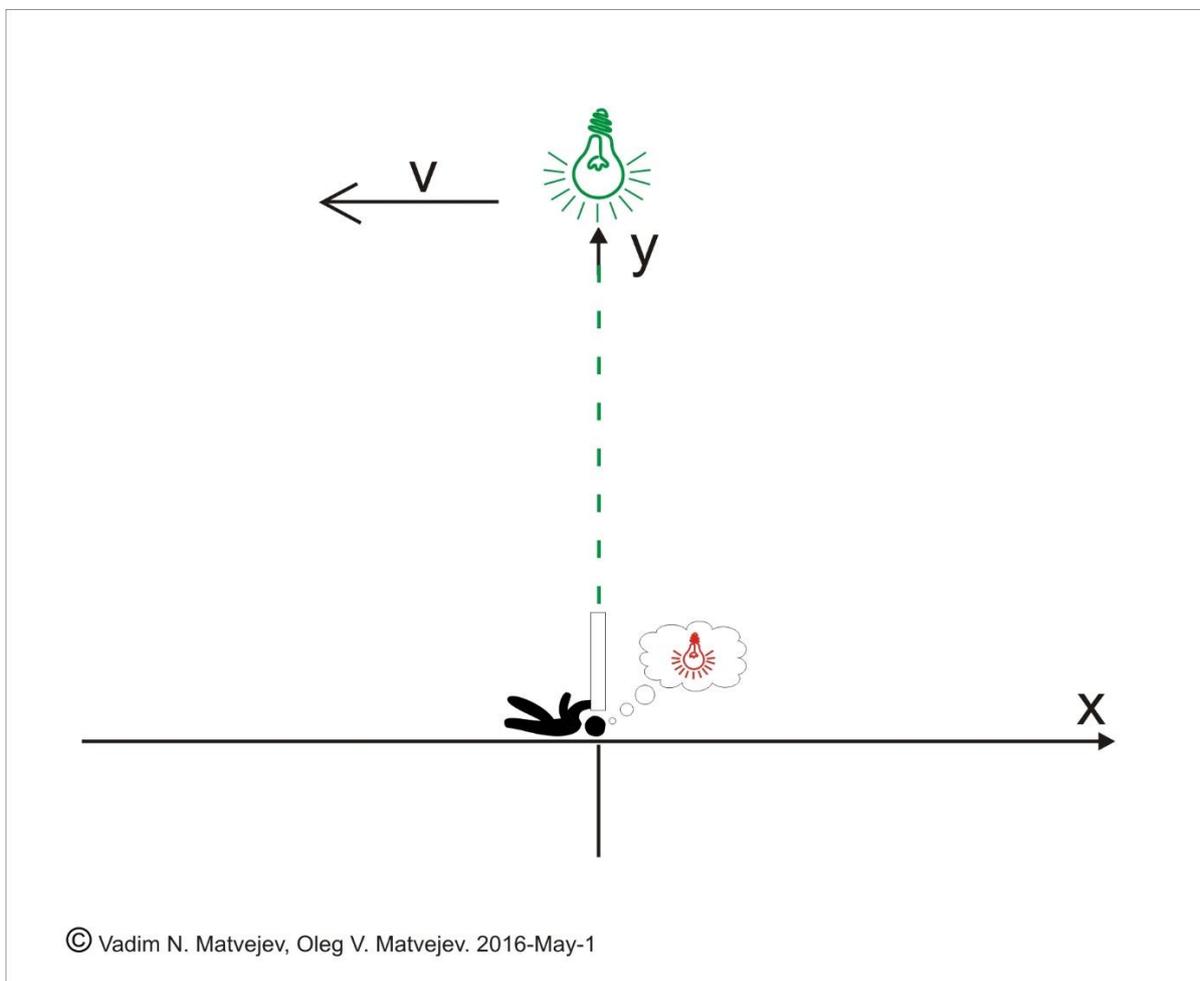


Рис. 1. Источник света движется в системе отсчета наблюдателя. Наблюдатель приписывает себе состояние покоя и направляет тубус перпендикулярно к направлению движения источника.

Однако, предположим что наблюдателю B надоело считать себя покоящимся, и он решил приписать себе состояние движения. Предположим, что он знает, какая у него и наблюдателя A относительная скорость движения и решает, что теперь наблюдатель A покоится, а он сам – наблюдатель B , – движется относительно наблюдателя A . Тогда наблюдатель B должен

учесть аберрацию и наклонить тубус на угол, соответствующий его относительной скорости. Он наклоняет тубус вперед (рис. 2), и что он видит? Он видит, что частота излучения сдвинулась в голубую, коротковолновую область. Наблюдатель *B* размышляет над этим феноменом и приходит к выводу, что поскольку теперь он движется, то он сам испытывает замедление времени и видит ускоренный темп хода часов наблюдателя *A*, и соответственно наблюдаемая им частота излучения увеличивается.

$$f_b = \gamma f_a \quad (2)$$

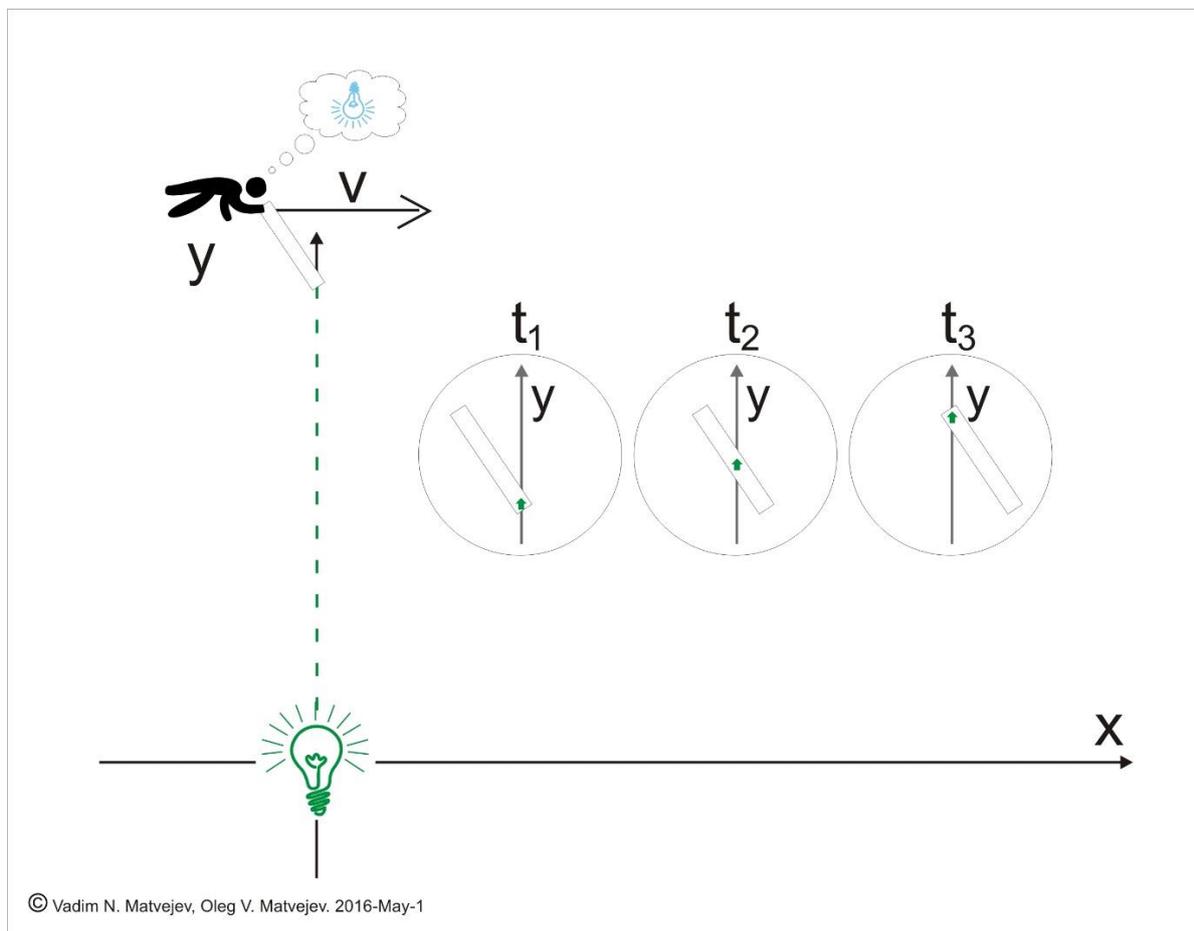


Рис. 2. Наблюдатель движется в системе отсчета источника, т.е. приписывает себе состояние относительного движения и принимает во внимание аберрацию.

Напомним, что наблюдатель *A* испускает зеленый свет. Может ли наблюдатель *B* увидеть не красный, не голубой а именно зеленый цвет лампочки? Да может. На какой угол ему нужно для этого повернуть тубус? Если наблюдатель *B* поворачивает тубус на угол, который соответствует примерно (учитывая релятивистское сложение скоростей) половине скорости его движения относительно наблюдателя *A*, то видит зеленый свет. Почему зеленый? Потому что, наклонив так тубус, он выбрал систему отсчета, в которой и он, и наблюдатель *A* движутся с одинаковыми скоростями в противоположном направлении. Соответственно, их часы замедляются одинаково.

Таким образом, наблюдатель *B* может смотреть куда угодно и видеть какой угодно цвет источника. Приписав себе соответствующую скорость, он может трактовать любое наблюдение как наблюдение поперечного эффекта Доплера (рис.3)

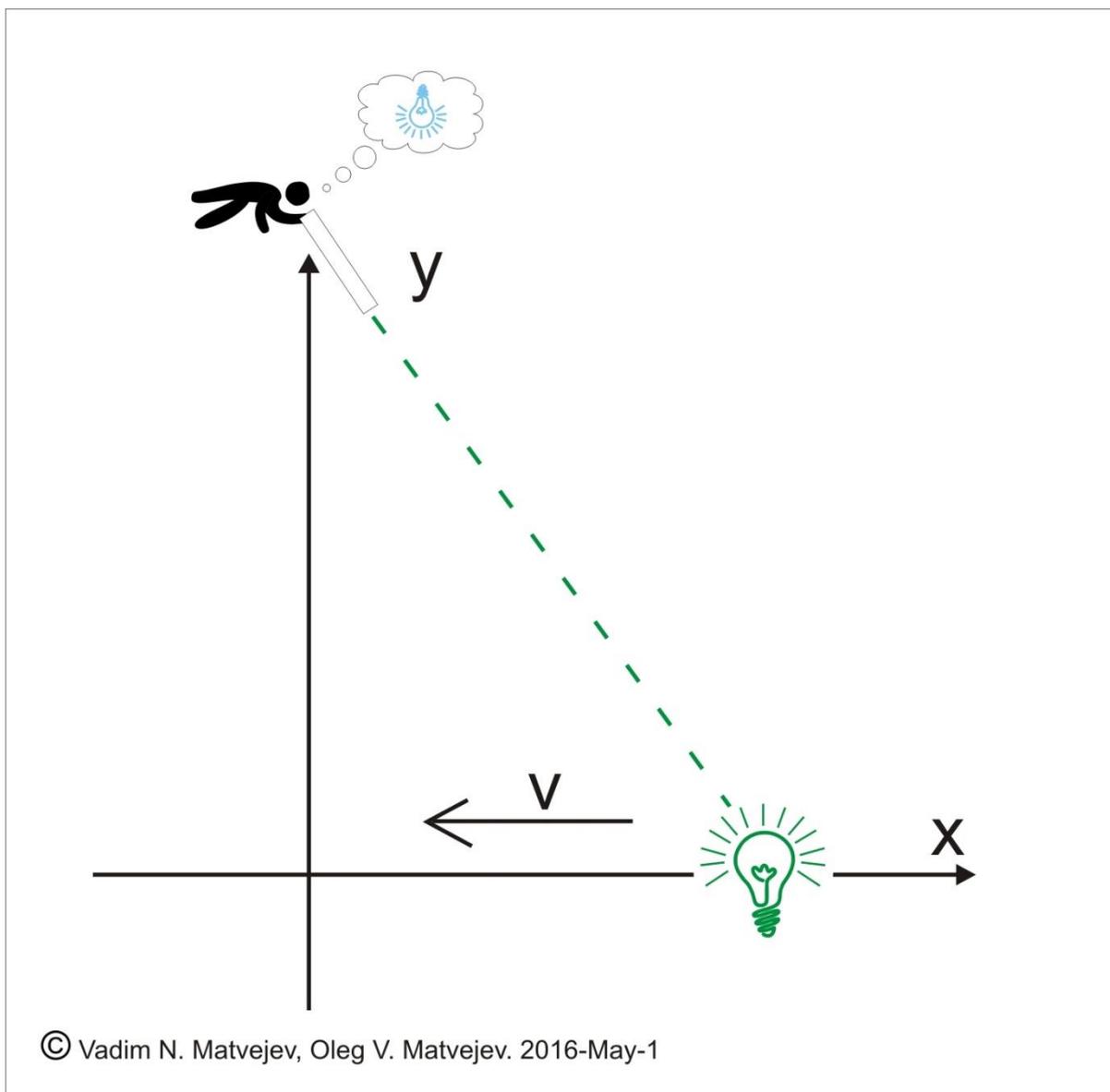


Рис. 3. Наблюдатель наклоняет тубус на некоторый угол вперед по ходу движения. Наблюдатель увидит голубой цвет лампочки. Свои наблюдения может истолковать двояко. Он может их объяснить либо продольным релятивистским эффектом Доплера (если он считает себя покоящимся) либо поперечным (если он приписывает себе состояние движения).

Теперь рассмотрим следующий пример. Наблюдатель *A* держит в руках не лампочку, которая испускает рассеянный свет, а лазерный “пулемет” который непрерывно стреляет направленными тоненькими импульсами зеленого цвета.

Опять же, наблюдатель *A* и наблюдатель *B* движутся друг относительно друга со скоростью *V*. При этом, они оба считают себя покоящимися. Точно, как в задаче о Джо и пришельцах.

Пусть наблюдатель *A* (Джо) располагается в начале системы координат в системе отсчета *K* и

стреляет из своего “пулемета” перпендикулярно оси x . Пришелец B движется в системе отсчета K со скоростью V и в момент наибольшего сближения с A , когда пересекает ось y , смотрит в свой тубус. Однако он тоже считает себя покоящимся и держит тубус перпендикулярно направлению своего движения. Что видит наблюдатель B ? Ровным счетом ничего, поскольку наблюдатель A держит “пулемет” тоже перпендикулярно, а наблюдатель B не учел аберрацию. Если наблюдатель B признает свое движение относительно наблюдателя A и учитывая аберрацию, поворачивает тубус на угол, соответствующий его относительной скорости, то видит луч лазера, который, однако, будет голубым. Как и в предыдущем случае, наблюдатель B понимает, что, поскольку он вынужденно приписал себе скорость, темп хода его собственных процессов и часов замедлился и он видит ускоренный ход часов наблюдателя A и, соответственно, более высокую частоту испускаемого света.

Можно задаться следующим вопросом: - А где же симметрия, ведь наблюдатель B ИМЕЕТ ПРАВО признать себя покоящимся?

Пусть теперь наблюдатель B считает себя покоящимся, а наблюдатель A со своим “пулеметом” пронесется мимо.

Наблюдатель B располагается в начале координат и держит тубус перпендикулярно оси x . Однако, для того, чтобы наблюдатель B увидел импульсы пулемета, поскольку теперь наблюдатель A движется в системе отсчета, связанной с наблюдателем B , наблюдатель A должен признать факт своего движения и наклонить “пулемет” на угол (пересекая ось y), соответствующий аберрации. Отклонить пулемет назад, против движения нужно, чтобы импульсы пошли по кратчайшему пути в тубус наблюдателя B . Теперь наблюдатель B покоится и видит импульсы красного цвета! Понятно почему - ведь наблюдатель A движется относительно него и часы его (наблюдателя A) замедляются и поэтому наблюдатель B наблюдает поперечный эффект Доплера и сдвиг частоты излучения в длинноволновую область.

Напомним, наблюдатель A «стреляет» импульсами зеленого цвета. Может ли наблюдатель B увидеть в свой тубус импульсы не красного и не голубого, а зеленого цвета?

Да, может. Для этого наблюдатель A должен отклонить пулемет назад на угол, соответствующий примерно половине их скорости друг относительно друга. Наблюдатель B , в свою очередь, должен наклонить тубус вперед на угол, соответствующий половине их скорости друг относительно друга (рис. 4).

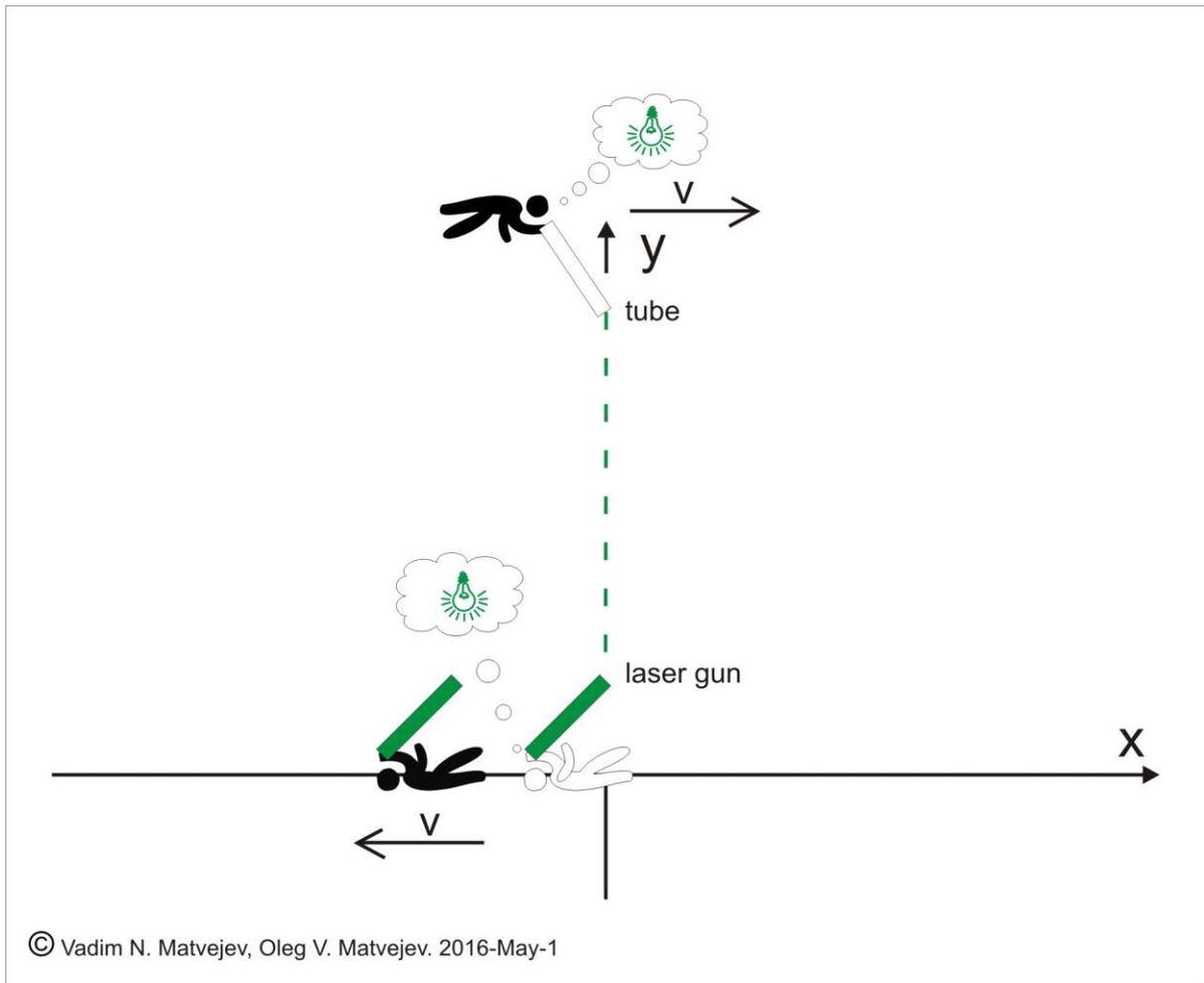


Рис. 4. Пришельцы и Джо могут приписать себе примерно по половине их относительной скорости каждый. Тогда пришельцы должны отклонить лазерную указку назад, а Джо наклонить тубус вперед по ходу движения на равные углы. В этом случае пришельцы увидят, что частота излучения источника не изменилась и цвет лампочки остался зеленым.

Таким образом, любой из них, наблюдатель *A* и наблюдатель *B*, вполне могут приписать себе состояние покоя. При этом они зафиксируют замедление времени, Лоренцево сокращение продольных размеров и замеднение темпа часов движущегося относительно них наблюдателя. Однако, чисто физически, если один приписал себе состояние покоя, другой должен будет приписать себе состояние движения.

Ведь наблюдатель *A* и наблюдатель *B* фактически движутся друг относительно друга! Двигутся, значит, движутся, а не покоятся друг относительно друга. Они движутся друг относительно друга в любой общей для них системе отсчета.

Теперь рассмотрим такой пример. Допустим наблюдатель *A* покоится в центре окружности, а наблюдатель *B* летает по окружности вокруг него. Двигутся они друг относительно друга или нет? Ведь расстояние между ними не меняется со временем. Что мы понимаем под движением?

Интересно, что если наблюдатель A держит в руках лампочку зеленого цвета, а наблюдатель B смотрит на него в тубус, то наблюдатель B увидит только голубой цвет. [6]-[8] Никакого другого цвета наблюдатель B увидеть не может. Разумеется, для учета абберации тубус должен быть наклонен на угол, соответствующий линейной скорости наблюдателя на окружности (рис. 5).

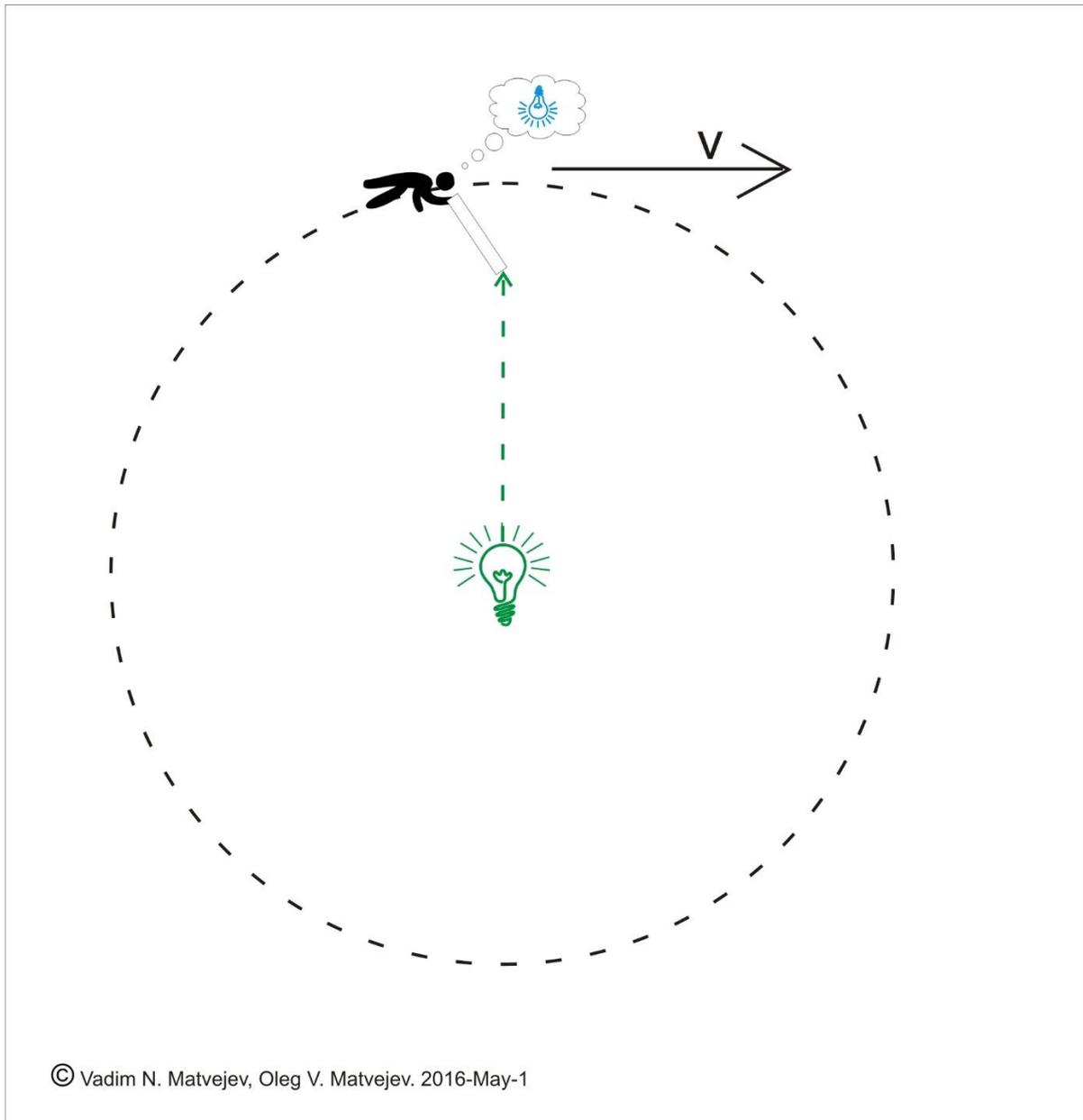


Рис. 5. Источник находится в центре, наблюдатель вращается вокруг него по окружности.

Если же наблюдатель B держит в руках лампочку зеленого цвета, а наблюдатель A смотрит на него в тубус, то он (наблюдатель A) увидит только красный цвет (рис. 6).

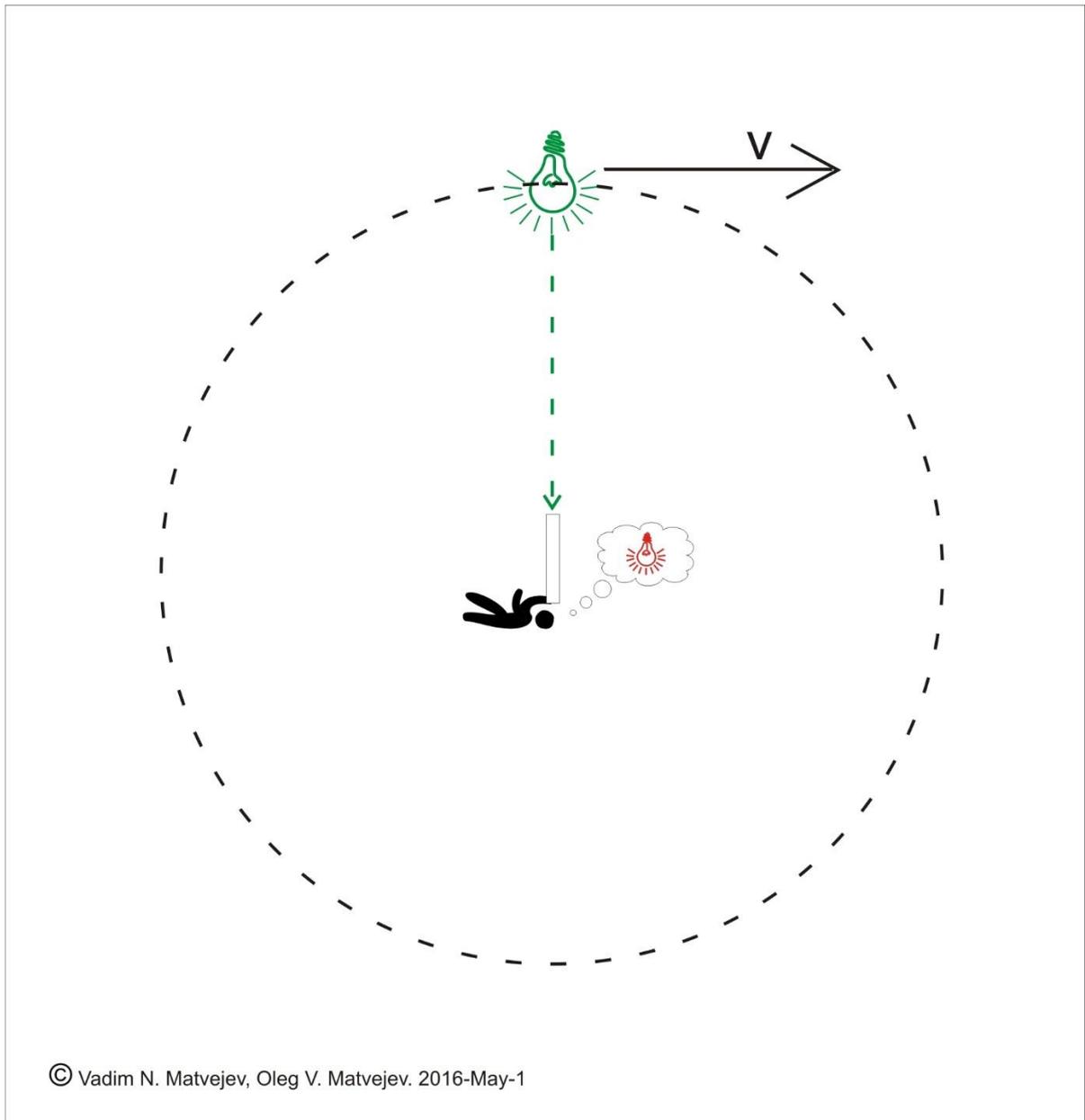


Рис. 6. Наблюдатель находится в центре окружности, источник вращается вокруг него.

Никакого другого цвета наблюдатель *A* увидеть не может.

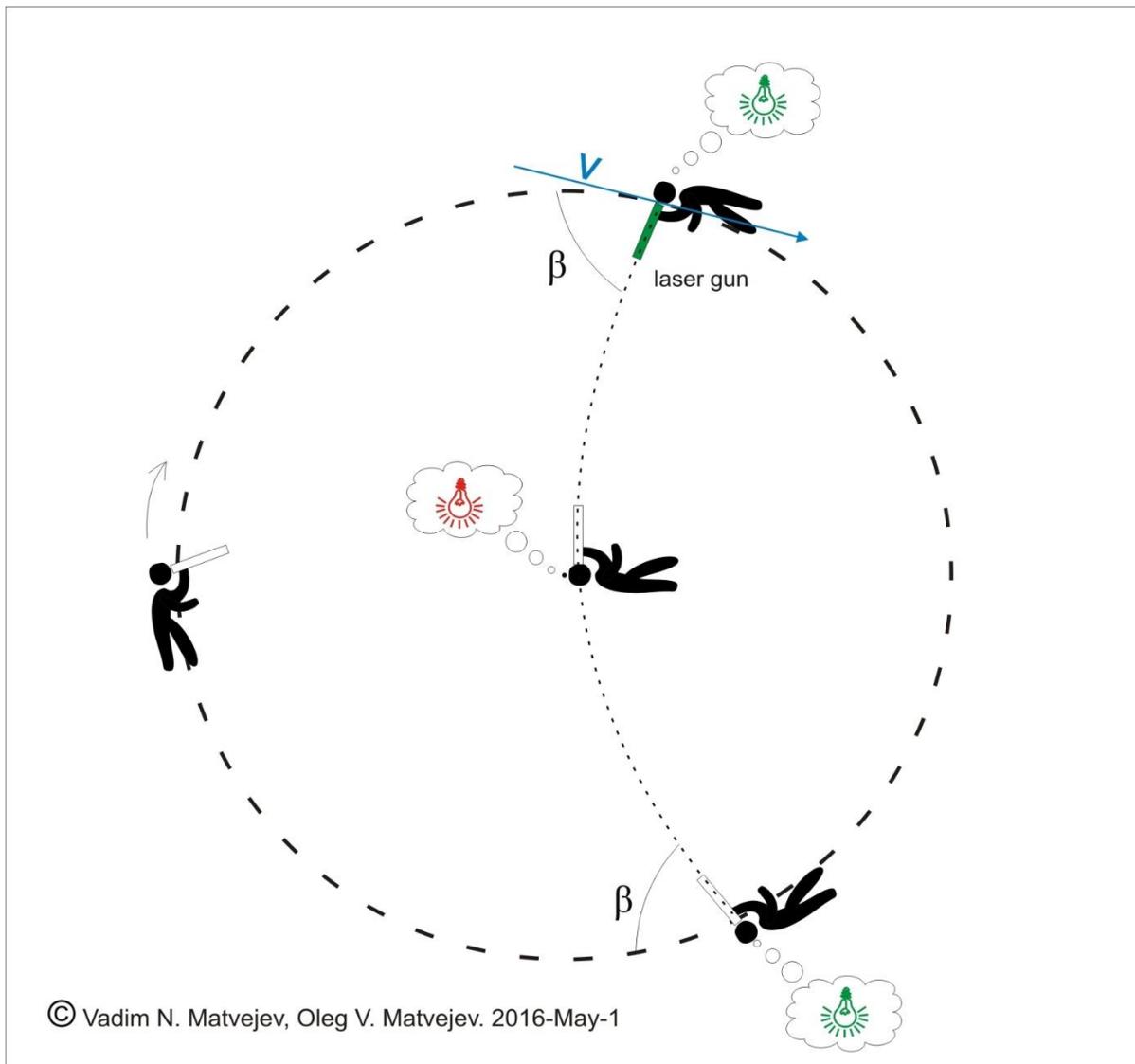


Рис. 7. Наблюдатель на противоположной стороне окружности не обнаружит изменения частоты излучения, полученного от источника. Это объясняется тем, что часы наблюдателя и источника замедляются одинаково. Однако наблюдатель в центре окружности зарегистрирует сдвиг излучения в коротковолновую часть спектра.

Таким образом, вопреки широко распространенному мнению, релятивистский наблюдатель может увидеть все, что он пожелает, – либо замедление темпа движущихся относительно него (в его системе отсчета) часов, либо его ускорение. Разные результаты наблюдений каждый из наблюдателей объяснит тем, что приписывает себе разную скорость в рамках той скорости, с которой они движутся друг относительно друга.

References

- [1] Zanchini E 2012 Phys. Scrip. 86 015004

- [2] Chen X L, An L, Huang X B, Yu C B and Xu L 2013 Phys. Scr. 89 067004
- [3] Kholmetskii AL, Yarman T and Missevitch Phys. Scr. 2014 Phys. Scrip. 89 067003
- [4] Zanchini E 2014 Phys. Scrip. 89 067005
- [5] Ives, H. E.; Stilwell, G. R. (1938). "An experimental study of the rate of a moving atomic clock". *Journal of the Optical Society of America* **28** (7): 215.
- [6] Hay HJ, Schiffer JP, Cranshaw TE and Egelstaff PA 1960 Phys. Rev. Letters 4, 165-166
- [7] Kundig W 1963 Phys. Rev. 129 2371 – 2375
- [8] Kholmetskii AL, Yarman T and Missevitch OV 2008 Phys. Scr. 77 035302
- [9] Kholmetskii AL, Yarman T and Missevitch OV 2009 Phys. Scr. 79 065007
- [10] Ray Paths in a rotating system Jennison R C 1963 Nature **199** 739-741