

**Оптика движущихся тел. Эффект Доплера.
Эффект Вавилова-Черенкова.**

Эффект Доплера

Изменение воспринимаемой частоты колебаний при относительном перемещении источника и приемника волн.

Для электромагнитных волн в вакууме

$$v = v_0 \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + (v/c) \cos \theta} = v_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \beta \cos \theta}$$

продольный эффект Доплера ($\theta=0$)

$$v \ll c$$

смещение частоты

$$v \approx v_0 (1 - \beta) = v_0 (1 - v/c)$$

$$v = c \Delta\lambda / \lambda$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$



Возможность определять скорость движения тел по доплеровскому смещению спектров

При удалении – уменьшении частоты (**красное смещение**)

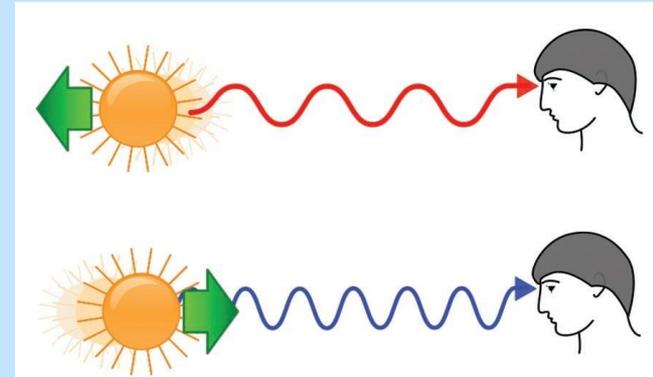
При приближении – увеличении частоты (**синее смещение**)

поперечный эффект Доплера ($\theta=\pi/2$) ⇨

$$v \ll c$$

$$v = v_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \approx v_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right)$$

$$v = v_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} = v_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$



v — воспринимаемая частота,
 v_0 — первоначальная частота,
 v — скорость относительного смещения приемника и источника,
 θ — угол между вектором скорости и направлением наблюдения (на приемник)

Поперечный эффект Доплера (1938), хотя и много меньше продольного, имеет принципиальное значение, так как не наблюдается в акустике!! (является, следовательно, **релятивистским эффектом**).

Он связан с замедлением течения времени движущегося наблюдателя.

● Эффект Доплера в релятивистском случае

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \beta \cos \vartheta},$$

где ν — частота электромагнитного излучения, воспринимаемого наблюдателем; ν_0 — собственная частота электромагнитного излучения, испускаемого неподвижным источником; $\beta = v/c$ — скорость источника электромагнитного излучения относительно наблюдателя; c — скорость распространения электромагнитного излучения в вакууме; ϑ — угол между вектором \mathbf{v} и направлением наблюдения, измеренный в системе отсчета, связанной с наблюдателем.

При движении источника вдоль прямой, соединяющей наблюдателя и источник, возможны два случая:

а) источник удаляется от наблюдателя ($\vartheta = 0$)

$$\nu = \nu_0 \sqrt{(1 - \beta)/(1 + \beta)},$$

б) источник приближается к наблюдателю ($\vartheta = \pi$)

$$\nu = \nu_0 \sqrt{(1 + \beta)/(1 - \beta)}.$$

● Эффект Доплера в нерелятивистском случае

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{v}{c} \cos \vartheta,$$

где $\Delta \nu$ — изменение частоты ($\Delta \nu = \nu - \nu_0$).

Излучение Вавилова-Черенкова

Эффект Вавилова — Черенкова — свечение, вызываемое в прозрачной среде заряженной частицей, которая движется со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения света в этой среде.

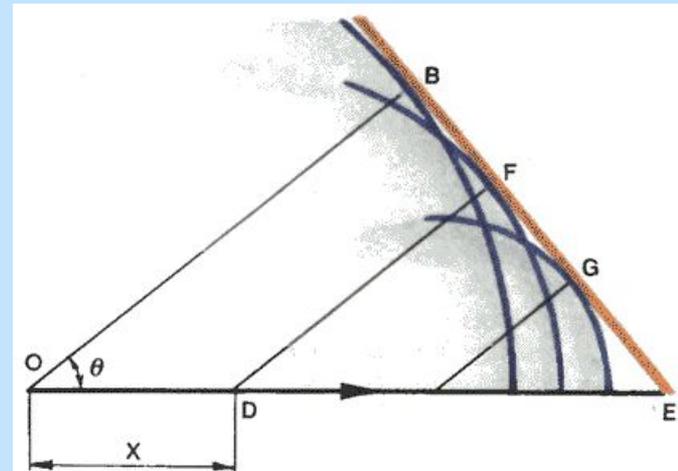
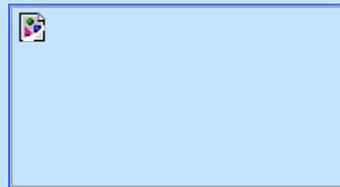
Черенковское излучение широко используется в физике высоких энергий для регистрации релятивистских частиц и определения их скоростей

Теория относительности: ни одно материальное тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Но в прозрачных средах свет движется с меньшей скоростью: в стекле или в воде, например, свет распространяется со скоростью, составляющей 60—70 % от скорости света в вакууме, и ничто не мешает быстрой частице (например, протону или электрону) двигаться быстрее света в такой среде

Излучение расходится конусом вокруг траектории движения частицы.

Условие когерентности волн исходящих из точек O и D в точках B и F: $T_1 = T_2$

$$\frac{OB}{c/n} = \frac{x}{v} + \frac{DF}{c/n}$$



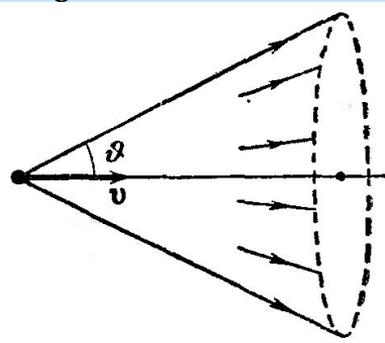
Угол при вершине конуса зависит от скорости частицы и от скорости света в среде. Это как раз и делает излучение Черенкова столь полезным с точки зрения физики элементарных частиц, поскольку, определив угол при вершине конуса, можно рассчитать по нему скорость частицы.

Излучение Вавилова-Черенкова

1958

При изучении люминесценция растворов солей урана под действием гамма-излучения.

В 1934 г. Черенков, работавший под руководством Вавилова, обнаружил особый вид свечения жидкостей под действием γ -лу



$$\cos \vartheta = \frac{c/n}{v} = \frac{c}{nv}$$

Свечение частично поляризовано, причем электрический вектор лежит преимущественно в плоскости, образованной световым лучом излучения и направлением движения электрона. Излучение направлено главным образом вперед.

В жидкостях и твердых телах условие Черенкова начинает выполняться для электронов при энергиях $W > 10^5$ эВ, а для протонов $W > 10^8$ эВ

В излучении преобладают короткие длины волны, поэтому голубая окраска (интенсивность излучения примерно пропорциональна частоте)

Эффект Вавилова-Черенкова наблюдался экспериментально для электронов, протонов и мезонов при движении их в жидких и твердых средах.



Излучение Вавилова-Черенкова в охлаждающей жидкости ядерного реактора.

● Эффект Вавилова — Черенкова. При движении заряженной частицы в некоторой среде со скоростью v , больше фазовой скорости света в данной среде, возникает излучение света. Свет этот распространяется по направлениям, составляющим острый угол ϑ с траекторией частицы, т. е. вдоль образующих конуса, ось которого совпадает с направлением скорости частицы. Угол ϑ определяется из соотношения

$$\cos \vartheta = v / (nc), \text{ или } \cos \vartheta = 1 / (\beta n),$$

где n — показатель преломления среды, в котором движется заряженная частица.

33.1. При какой предельной скорости v (в долях скорости света) источника можно вместо релятивистской формулы $\nu = \nu_0 \sqrt{(1 - \beta)/(1 + \beta)}$ для эффекта Доплера пользоваться приближенным выражением $\nu \approx \nu_0 (1 - \beta)$, если погрешность в определении частоты не должна превышать 1 %?

33.4. При изучении спектра излучения некоторой туманности линия излучения водорода ($\lambda_\alpha = 656,3$ нм) оказалась смещенной на $\Delta\lambda = 2,5$ нм в область с большей длиной волны (красное смещение). Найти скорость v движения туманности относительно Земли и указать, удаляется она от Земли или приближается к ней.

33.5. Определить обусловленное эффектом Доплера уширение $\Delta\lambda/\lambda$ спектральных линий излучения атомарного водорода, находящегося при температуре $T = 300$ К.

33.10. Приемник радиолокатора регистрирует частоты биений между частотой сигнала, посылаемого передатчиком, и частотой сигнала, отраженного от движущегося объекта. Определить скорость v приближающейся по направлению к локатору ракеты, если он работает на частоту $\nu_0 = 600$ МГц и частота ν_1 биений равна 4 кГц.

33.12. Длины волн излучения релятивистских атомов, движущихся по направлению к наблюдателю, оказались в два раза меньше, чем соответствующие длины волн нерелятивистских атомов. Определить скорость v (в долях скорости света) релятивистских атомов.

33.15. Какой наименьшей скоростью v должен обладать электрон, чтобы в среде с показателем преломления $n=1,60$ возникло черенковское излучение?

33.17. Найти наименьшую ускоряющую разность потенциалов U_{\min} , которую должен пройти электрон, чтобы в среде с показателем преломления $n=1,50$ возникло черенковское излучение.

33.19. Электрон с кинетической энергией $T=0,51$ МэВ движется в воде. Определить угол ϑ , составляемый черенковским излучением с направлением движения электрона.

5.132. Определить доплеровское смещение $\Delta\lambda$ для спектральной линии атомарного водорода ($\lambda = 486,1 \text{ нм}$), если ее наблюдать под прямым углом к пучку атомов водорода с кинетической энергией $T = 100 \text{ кэВ}$.
[51,7 пм]

Изучая спектры свечения атомарного водорода в галактике Андромеда (M31) с помощью околоземного телескопа Хаббл исследователи установили, что линия излучения атомарного водорода H α имеет длину волны $\lambda = 655.60$ нм вместо наблюдаемых в земных условиях длины волны $\lambda = 656.28$ нм. Определите с какой скоростью галактика Андромеда и галактика Млечный Путь сближаются, учтя, что:

- Галактика Андромеда движется точно по направлению к галактике Млечный Путь
- Солнечная система находится во вращательном движении с периодом обращения 230 млн. лет относительно галактического ядра Млечного Пути
- Расстояние от Солнечной системы до галактического ядра составляет 27000 световых лет
- Ориентация галактик, место нахождения Солнечной системы в галактике Млечный Путь и направление вращения Млечного пути представлены на рисунке
- Расстояние между галактиками составляет 2.54 млн. световых лет;
- Свечение водорода в галактике Андромеда регистрировалась из областей неподвижных относительно её центра

Collision Scenario for Milky Way and Andromeda Galaxy Encounter

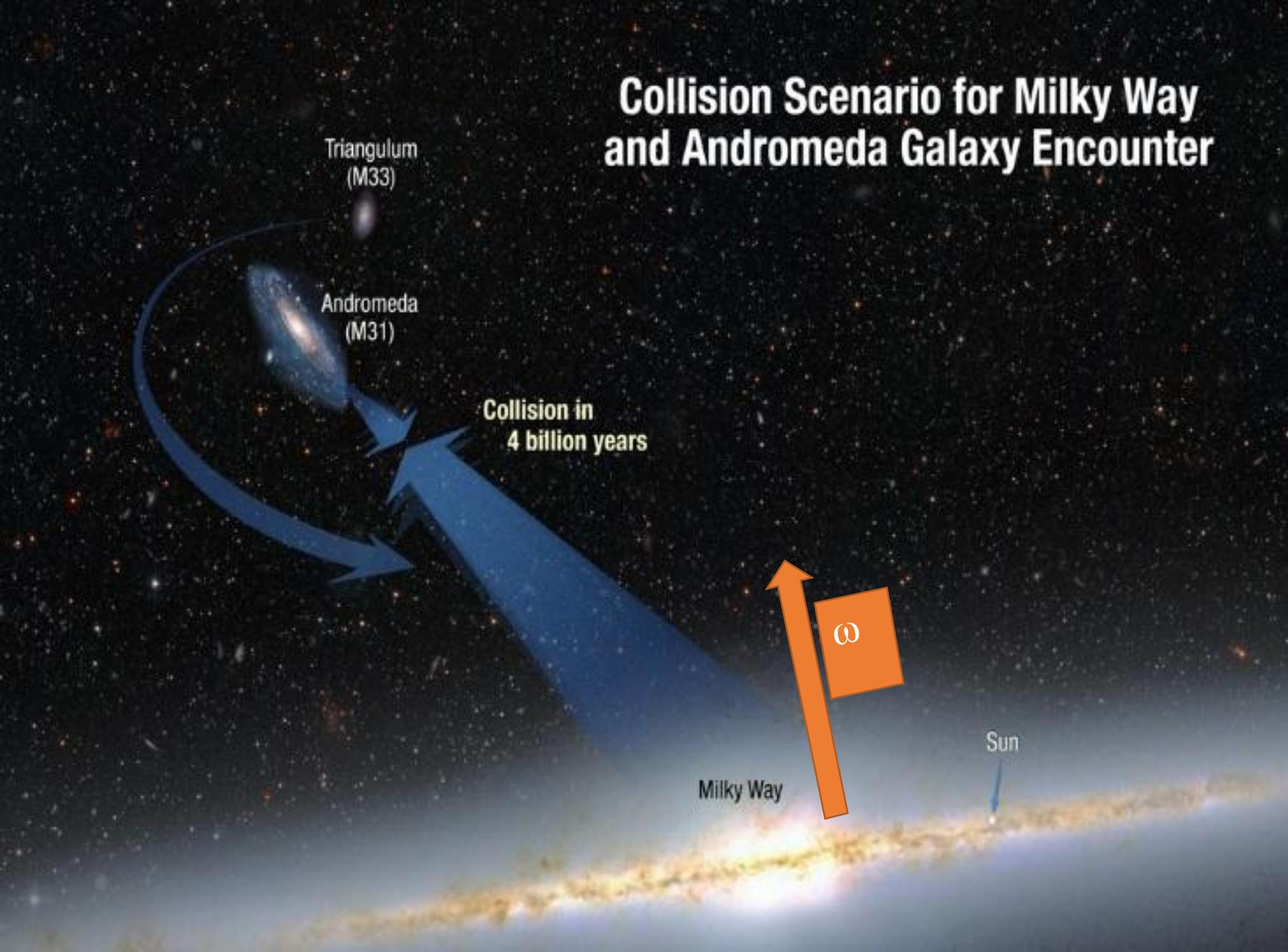
Triangulum (M33)

Andromeda (M31)

Collision in 4 billion years

Milky Way

Sun



Проверочная по теме 4

32.8. Параллельный пучок естественного света падает на сферическую каплю воды. Найти угол φ между отраженным и падающим пучками в точке A (рис. 32.5).

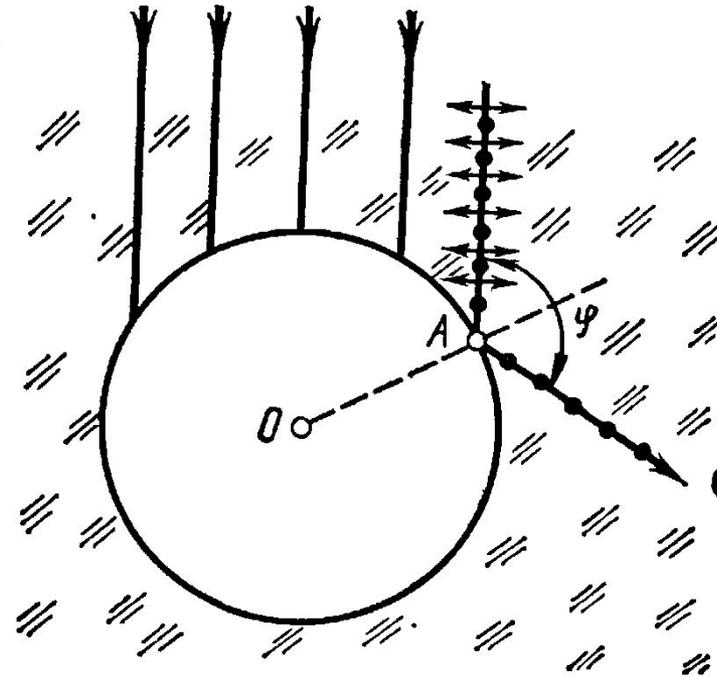


Рис. 32.5

Д/З

Ч. /// 33.2 /// 33.3 /// 33.6 /// 33.11 /// 33.14 /// 33.16

Т. /// 5.135