

ственной рукой. Выдвинем прямую руку перед собой и, раздвинув указательный и средний пальцы, изобразим ими знак победы — латинскую букву V. Теперь, прищурившись, посмотрим одним глазом на эту букву V. Угол, под которым вы увидите раздвинутые пальцы вытянутой руки, и будет углом примерно в 5°, или в 1/10 рад.

Я часто пользуюсь этим способом, измеряя угол между Солнцем и горизонтом, чтобы определить время, оставшееся до захода Солнца. Кстати, угловой размер Солнца — примерно 0,5° (или 30'), такой же, как и угловой размер Луны. Угол, под которым вы увидите ноготь указательного пальца вытянутой руки, будет примерно в три раза больше — 1,5°.

Можно найти фонарик с большим отражателем — сантиметров 10–12. Угол расхождения луча у такого фонарика будет, соответственно, примерно в 3 раза меньше. На Западе распространены фонарики с маленькими лампочками большой мощности. Они позволяют еще лучше сфокусировать пучок.

А на каком расстоянии можно увидеть луч фонарика? Обычный фонарик потребляет мощность примерно 1 Вт. Только 1/20 часть этой мощности излучается как видимый свет — остальное теряется на нагрев и тепловое излучение. Мощность W , излучаемая фонариком, сконцентрирована внутри телесного угла $\Omega = \pi\alpha^2$. На расстоянии R от фонарика мощность излучения, приходящаяся на единицу площади поверхности, равна $W/(\Omega R^2)$. Мощность w света, попадающего в глаз с расстояния R , равна $WS_{\text{гл}}/(\Omega R^2)$, где $S_{\text{гл}}$ — площадь зрачка глаза. Зрачок глаза человека в темноте имеет диаметр около 7 мм, т.е. площадь зрачка $S_{\text{гл}} \approx 0,5 \text{ см}^2$. Если мощность w превышает некоторый порог w_{min} , мы видим свет. Минимальная пороговая мощность w_{min} глаза человека может быть очень мала — около 10^{-18} Вт, что соответствует нескольким фотонам в секунду. Такая чувствительность возможна только после длительной адаптации глаза к темноте — если бы можно было поставить эксперимент в полной темноте и при отсутствии рассеяния света в атмосфере, мы смогли бы увидеть свет фонарика на расстоянии в десять тысяч километров. Реальная пороговая мощность глаза на много порядков выше, в

основном это связано с присутствием ярких посторонних объектов, находящихся в поле зрения глаза, — уличных фонарей, ночных огней, звезд, Луны и т.д. В дальнейшем для обсуждения экспериментов, проводимых на открытом воздухе в безлунную ночь, мы будем использовать значение $w_{\text{min}} = 10^{-13}$ Вт. Подставляя числовые значения в формулу

$$R = \sqrt{\frac{WS_{\text{гл}}}{w_{\text{min}}\Omega}}, \quad (1)$$

получим $R = 27$ км.

А как далеко можно осветить что-нибудь с помощью фонарика? Оказывается, это расстояние не превышает нескольких десятков метров. Когда мы освещаем предмет (например, кошку), мы хотим увидеть свет, отраженный от этого предмета. Полная мощность света, который попадает на предмет, находящийся на расстоянии R , описывается формулой $WS/(\Omega R^2)$, где S — это площадь поверхности предмета (для кошки $S_{\text{к}} \approx 200 \text{ см}^2$). Мы будем считать, что кошка белая (не серая и не черная), т.е. большая часть света рассеивается, а не поглощается. Если этот свет рассеивается во все стороны, то нам в глаз попадает только незначительная часть рассеянного света. Эта доля равна отношению площади поверхности глаза к 1/4 площади сферы радиусом R , т.е. отношению $S_{\text{гл}}/(\pi R^2)$. (Множитель 1/4 получается для случая, если рассеивающая поверхность перпендикулярна к направлению пучка и к наблюдателю. При его получении было учтено, что полный поток света от рассеивающей поверхности пропорционален телесному углу, под которым эта поверхность видна наблюдателю.) Мощность света, попадающего в глаз наблюдателю, равна $WS_{\text{к}}S_{\text{гл}}/(\pi\Omega R^4)$. Приравнявая эту величину к w_{min} , получим

$$R = \sqrt[4]{\frac{WS_{\text{к}}S_{\text{гл}}}{w_{\text{min}}\pi\Omega}} = 45 \text{ м}. \quad (2)$$

Получается, что кошка может увидеть луч фонарика за десятки километров, а мы можем осветить ее, только подойдя на 45 метров. (Похожая ситуация возникает с полицейскими радарам для измерения скорости автомобилей. Полицейский сидит в засаде и, используя радиоло-

катор, пытается получить сигнал, отраженный от машин на шоссе. Если у вас в машине есть прибор, который обнаруживает излучение полицейского радара, вы можете узнать о засаде гораздо раньше, чем попадете в зону действия радара.) Из формулы (2) видно, что если вы хотите увеличить вдвое радиус обнаружения кошки, вам придется увеличить мощность фонарика в $2^4 = 16$ раз. При этом кошка сможет заметить ваш более мощный фонарик с расстояния, в 4 раза большего, чем прежде.

Лазерная указка

Самая дешевая лазерная указка (ЛУ) может спроектировать «зайчик» на предметы, отстоящие от нас в темноте на сотни метров. На упаковке может быть указано, например, 200, 500, 800 или даже 1200 м. Причем мощность ЛУ ничтожна. В Америке разрешены ЛУ мощностью 5 мВт, в Европе — мощностью 1 мВт. Обычно указывается мощность, которую лазер потребляет. Мощность же, которую он излучает, составляет примерно 60% от входной мощности.

Фантастическая способность такого маломощного прибора «ставить точку» почти на любом доме на слабо освещенной улице вызывает искреннее изумление. Причина такой способности связана, конечно, с необычайно малой расходимостью лазерного пучка. Теоретически угол расходимости α определяется только диаметром начального пучка D и длиной волны λ :

$$\alpha = \lambda/D. \quad (3)$$

Для ЛУ красного цвета (длина волны 600–700 нм) можно пользоваться формулой

$$\alpha \text{ (в миллирадианах)} = 1/D \text{ (в миллиметрах)}. \quad (4)$$

Примечательно, что эта же формула определяет и теоретическое угловое разрешение человеческого глаза, только под D надо понимать диаметр зрачка глаза. Поскольку и диаметр лазерного пучка, и размер зрачка составляют несколько миллиметров и примерно равны, угол расходимости пучка примерно равен углу разрешения глаза. Практически лазерный пучок расходится несколько сильнее — примерно на 1 см каждые