

Рис. 3

чтобы предмет находился за фокусом объектива – тогда изображение \$I'\$ будет действительным, а это изображение чтобы находилось между окуляром и его фокусом – тогда окончательное изображение \$I''\$ будет мнимым.

Геометрическая оптика дает для увеличения микроскопа следующее выражение (см. рис.3):

$$\frac{X}{x} = \frac{D_0 \delta}{F_{ок} F_{об}},$$

где \$\delta\$ – расстояние между фокусами объектива и окуляра, \$D\_0\$ – так называемое расстояние наилучшего зрения. Увеличение микроскопа может быть значительным. Например, для характерных значений \$F\_{об} = 2\$ мм, \$F\_{ок} = 15\$ мм, \$\delta = 160\$ мм и \$D\_0 = 250\$ мм получим \$X/x = 1335\$.

Казалось бы, это не предел – надо лишь делать линзы все более совершенными геометрически (шлифовать), устранять их недостатки (апланатизм, астигматизм, хроматическую и сферическую аберрации, дисторсию...) и все

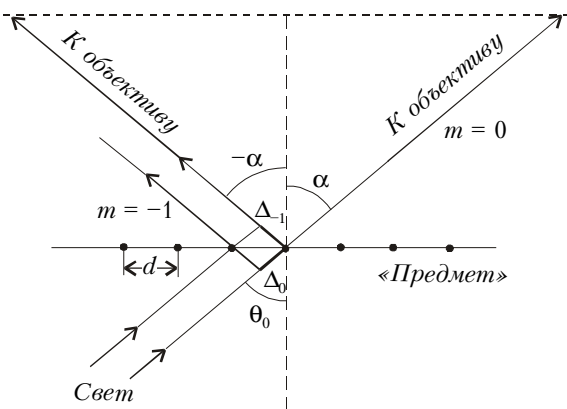


Рис. 4

будет в порядке. Но и тут вмешалась все та же \$\lambda\$!

Теорию разрешающей способности микроскопа разработал Аббе (о нем совсем недавно рассказывалось в «Кванте» – см. №1 за 2000 г.). Он предложил рассмотреть в микроскоп дифракционную решетку (рис.4). Какую минимальную информацию можно получить об этой решетке? Конечно, прежде всего можно узнать ее период \$d\$.

Как известно, при прохождении через решетку света с длиной волны \$\lambda\$ должен получиться набор дифракционных максимумов. Если свет падает на решетку под углом \$\theta\_0\$, то направление на эти максимумы определяется условием

$$\Delta_m - \Delta_0 = d \sin \theta_{m \max} - d \sin \theta_0 = m\lambda. \quad (5)$$

Чтобы микроскоп дал информацию о периоде \$d\$, в его объектив должны прийти по крайней мере два луча, соответствующих двум соседним максимумам дифракционной картины, например \$m = 0\$ и \$m = -1\$. Именно такой предельный случай \$\alpha = \theta\_0\$ и \$-\alpha = \theta\_{-1 \max}\$ изображен на рисунке 4. Заметим, что период решетки \$d\$, который мы стремимся рассмотреть, конечно, очень мал – порядка микрометров. В этом масштабе объектив микроскопа и его фокусное расстояние (порядка миллиметров) таковы, что сам объектив нужно было бы изобразить далеко за пределами рисунка (порядка метров); поэтому он показан штриховой линией лишь условно (а идущие к нему от узлов решетки лучи почти параллельны).

Итак, из условия (5) получим \$2d \sin \alpha = \lambda\$ (\$\alpha\$ называется апертурным углом). Значит, при заданной длине волны подсветки наименьший период решетки, который можно «рассмотреть» в микроскоп, равен \$d\_{\min} = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}\$.

Можно еще облегчить дело: если между решеткой и объективом поместить среду с коэффициентом преломления \$n\$ (например, капнуть какую-либо жидкость), то увеличится *оптическая разность хода* (ведь в этой среде скорость света и длина волны станут в \$n\$ раз меньше). В результате получим

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}. \quad (6)$$

Теперь сравним разрешающие способности телескопа и микроскопа. Получается, что мы выдвигаем прямо противоположные требования:

для телескопа \$\frac{\lambda}{D} \approx \alpha\_{\min}\$ желательно

делать как можно меньше;

для микроскопа \$\frac{\lambda}{d} \approx 2n \sin \alpha\$ желательно

делать как можно больше.

Отсюда понятно стремление строить телескопы с возможно большим диаметром входного «зрачка», а микроскопы – с возможно меньшим фокусным расстоянием объектива (чтобы \$\sin \alpha\$ был как можно ближе к единице) и при этом пространство между объективом и предметом наблюдения следует заполнить жидкостью с возможно большим показателем преломления \$n\$ (так называемая *иммерсионная техника*).

Что же достигнуто человечеством?

Самый большой диаметр объектива оптического телескопа \$D \sim 6\$ м. Для «средней» длины волны света \$\lambda \sim 0,6\$ мкм из выражений (3) и (4) будем иметь \$\alpha\_{\min} \sim 10^{-7}\$. Принимая радиус Вселенной \$R \sim 10^{26}\$ м, для двух разрешимых точек на ее «границе» получим

$$l_{\min} \sim R \alpha_{\min} \sim 10^{19} \text{ м.}$$

В случае микроскопа положим \$\sin \alpha \le 1\$, \$n \approx 1,6\$ (коэффициент преломления анилина). Тогда из равенства (6) найдем

$$d_{\min} \gtrsim \frac{\lambda}{4} \sim 0,1 \text{ мкм} = 10^{-7} \text{ м.}$$

Таковы характерные пределы возможностей этих замечательных оптических приборов.