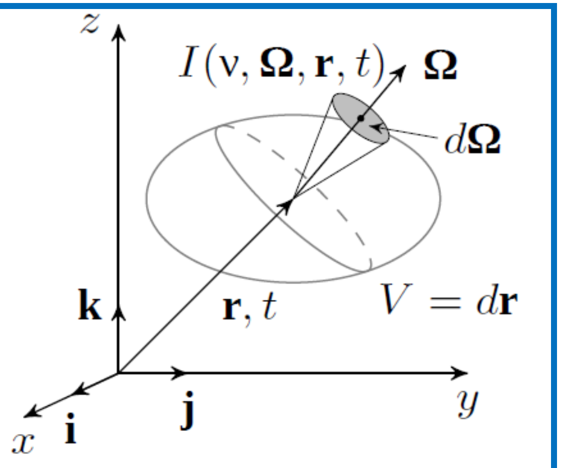
В случае, если рассматриваемая сплошная среда (СС) находится в состоянии ПТР, то поле излучения в такой среде соответствует излучению АЧТ при температуре среды. В этом случае основной количественной характеристикой поля излучения является **спектральная интенсивность излучения АЧТ** – аналитическое выражение (формула Планка).

Если среда не находится в состоянии ПТР, то все макроскопические характеристики $T(\mathbf{r}, t)$, $P(\mathbf{r}, t)$, $\rho(\mathbf{r}, t)$, $C_\alpha(\mathbf{r}, t)$ ($\alpha = 1, 2, \ldots, N$) и $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ изменяются в пространстве и времени. В этом случае поле излучения также будет отлично от излучения АЧТ. Для количественного описания поля излучения в этом случае необходимо привлекать специальное уравнение, которое в рамках феноменологической модели среды получило название **уравнение переноса лучистой энергии (УПЛЭ)**. Перед тем, как вывести это уравнение, необходимо ввести **основные понятия феноменологической теории переноса излучения.**



Элементарный физический объем (ЭФО) для описания излучения в СС

Как и в случае рассмотрения классических макроскопических свойств сплошной среды, при рассмотрении характеристик поля излучения ключевым понятием будет элементарный физический объём (ЭФО). Введём понятия **единичного вектора *Ω***, характеризующего направление распространения фотонов в точке ($\mathbf{r}$, t) и элементарного телесного угла d***Ω*** около ***Ω***:

$$\vec{\Omega} = \vec{i}\cos(\vec{\Omega},\vec{i}) + \vec{j}\cos(\vec{\Omega},\vec{j}) + \vec{k}\cos(\vec{\Omega},\vec{k}) \quad (1)$$

вектор скорости распространения фотонов: $\vec{V_f} = |\vec{V_f}|\vec{\mathbf{\Omega}}$, (2) ($|\vec{V_f}| = C$ –скорость света в общем случае в среде); **вектор импульса фотонов**: $\vec{\boldsymbol{P}} = \frac{h\nu}{c}\vec{\boldsymbol{\Omega}}$ (3).

Спектральная функция распределения фотонов $f(\nu, \mathbf{\Omega}, \mathbf{r}, t)$ — число фотонов, обладающих энергией от $h\nu$ до $h(\nu + d\nu)$, находящихся в момент t в ЭФО около точки $\mathbf{r}$, распространяющихся в $d\mathbf{\Omega}$, ось которого $\mathbf{\Omega}$. (далее такие фотоны будем называть «фотоны **данного сорта**»). $f(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t)d\nu d\vec{\Omega}d\vec{r}$ (4).

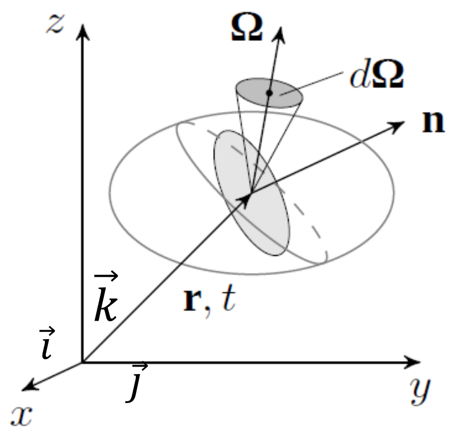
Спектральная интенсивность, **излучения** $I(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t)$ — количество лучистой энергии, переносимой фотонами **данного сорта** в единицу времени через элементарную площадку dA, помещённую в точке $\vec{r}$, перпендикулярную к $\vec{\Omega}$.

$$I(\nu, \vec{\Omega},\vec{r}, t) = f(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t) \cdot h\nu \cdot \vec{\mathbf{\Omega}} \cdot \vec{V_f} = h\nu\, C\, f(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t). \ (5).$$ В случае ПТР $I(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t) = B(\nu,T)$

Основные понятия теории переноса излучения (2)

Спектральная направленная плотность лучистой энергии *U(ν, **Ω**, **r**, t)* —количество энергии, излучённой фотонами данного сорта: $\boldsymbol{U\left(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t\right) = f\left(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t\right)\cdot h\nu = \frac{1}{c}I\left(\nu,f\left(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t\right)\cdot h\nu\vec{r},t\right)}$ (6).

Спектральная объёмная плотность лучистой энергии: $\boldsymbol{U(\nu,\vec{r},t)} = \int_{(4\pi)} U\left(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t\right)d\,\vec{\Omega}$ **(7)**



Плотность спектрального одностороннего потока излучения через произвольно ориентированную элементарную площадку, задаваемую нормалью $\vec{\boldsymbol{n}}$.
Количество энергии излучения, переносимой в диапазоне от *hν* до *h(ν+dν)* в единицу времени через элементарную площадку, ориентированную $\vec{\boldsymbol{n}}$ в положительном (+, ↑) или отрицательном (−, ↓) направлениях по отношению к $\vec{\boldsymbol{n}}$**:**

$$\boldsymbol{q}^{(\pm)}(\boldsymbol{\nu},\vec{\boldsymbol{n}},\vec{\boldsymbol{r}},\boldsymbol{t}) = \int_{\binom{+2\pi}{-2\pi}} f\left(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t\right)\cdot h\nu\cdot\vec{v}_f\cdot\vec{\Omega}\cos\left(\vec{n},\vec{\Omega}\right)d\vec{\Omega} = \int_{\binom{+2\pi}{-2\pi}} \boldsymbol{I\left(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t\right)\cos\left(\vec{n},\vec{\Omega}\right)d\vec{\Omega}} \quad (8)$$

Вектор плотности полного спектрального потока лучистой энергии: $\boldsymbol{\vec{q}(\nu,\vec{r},t)}$ - вектор плотности спектральной энергии излучения фотонов данного сорта, переносимой в единицу времени в момент *t* в точке ***r*** ЭФО. Определяется через (8), если в качестве ориентированных площадок выбрать элементарные площадки с ортами $\vec{\boldsymbol{\imath}},\vec{\boldsymbol{\jmath}},\vec{\boldsymbol{k}}$:

$$\boldsymbol{\vec{q}(\nu,\vec{r},t)} = \int\limits_{(4\pi)} \boldsymbol{I\left(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t\right)\cos\left(\vec{\imath},\vec{\Omega}\right)\vec{\imath}d\vec{\Omega}} + \int\limits_{(4\pi)} \boldsymbol{I\left(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t\right)\cos\left(j,\vec{\Omega}\right)\vec{\jmath}d\vec{\Omega}} + \int\limits_{(4\pi)} \boldsymbol{I\left(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t\right)\cos\left(\vec{k},\vec{\Omega}\right)\vec{k}d\vec{\Omega}} \quad (9).$$

Т.к. $\vec{\Omega} = \vec{\imath}\cos\left(\vec{\Omega},\vec{\imath}\right) + \vec{\jmath}\cos\left(\vec{\Omega},\vec{\jmath}\right) + \vec{k}\cos\left(\vec{\Omega},\vec{k}\right)$ (1) $\quad \boldsymbol{\vec{q}(\nu,\vec{r},t)} = \int_{(4\pi)} \boldsymbol{I\left(\nu,\vec{\Omega},\vec{r},t\right)\vec{\Omega}d\vec{\Omega}}$ (10).

Основные понятия теории переноса излучения (3)

Очевидно, что $\vec{\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{\nu},\vec{\boldsymbol{r}},\boldsymbol{t}) = \vec{\boldsymbol{q}}^{(+)}(\boldsymbol{\nu},\vec{\boldsymbol{r}},\boldsymbol{t}) - \vec{\boldsymbol{q}}^{(-)}(\boldsymbol{\nu},\vec{\boldsymbol{r}},\boldsymbol{t})$ (11), где $\vec{\boldsymbol{q}}^{(+)}(\nu,\vec{\boldsymbol{r}},t)$ и $\vec{\boldsymbol{q}}^{(-)}(\nu,\vec{\boldsymbol{r}},t)$ - векторы плотности односторонних (+) и (−) спектральных потоков энергии излучения.

В случае, если $\boldsymbol{I}(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\Omega},\boldsymbol{r},\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{B}(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{T})$ (состояние ПТР), $\vec{\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{\nu},\vec{\boldsymbol{r}},\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{0}$

Формулы (5) – (10) определяют основные понятия теории переноса излучения в сплошной среде, относящиеся к **спектральным (монохроматическим**) характеристикам. При решении некоторых задач приходится иметь дело с **интегральными по спектру характеристиками** поля излучения.

Например! Уравнение сохранения полной энергии СС при наличии излучения:

$$\rho\frac{dE}{dt} = -div(\vec{q} + \vec{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{R}}) - div\overleftrightarrow{A};\ E = U + \frac{|\vec{V}|^2}{2} + \Pi + \boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{R}},$$

где $\vec{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{R}}(\vec{\boldsymbol{r}},t)$ и $\boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{R}}(\vec{\boldsymbol{r}},\boldsymbol{t})$.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\boldsymbol{R}}(\vec{\boldsymbol{r}},\boldsymbol{t}) = \int_0^\infty U(\nu,\vec{r},t)d\nu = \frac{1}{c}\int_0^\infty \left[\int_{(4\pi)} I(\nu,\Omega,r,t)\, d\vec{\boldsymbol{\Omega}}\right] d\nu \qquad (12)$$

$$\vec{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{R}}(\vec{\boldsymbol{r}},\boldsymbol{t}) = \int_0^\infty \vec{\boldsymbol{q}}(\nu,\vec{r},t)d\nu = \frac{1}{c}\int_0^\infty \left[\int_{(4\pi)} I(\nu,\Omega,r,t)\vec{\boldsymbol{\Omega}}\, d\vec{\boldsymbol{\Omega}}\right] d\nu \qquad (13)$$

Оценка максимального вклада излучения в уравнения движения СС (условия земной атмосферы)

$\rho \frac{dE}{dt} = -div(\vec{q} + \vec{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{R}}) - div\overleftrightarrow{A};\ E = U + \frac{|\vec{V}|^2}{2} + \Pi + \boldsymbol{\varepsilon_R}$, где $\vec{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{R}}(\vec{\boldsymbol{r}}, t)$ и $\boldsymbol{\varepsilon_R}(\vec{\boldsymbol{r}}, \boldsymbol{t})$ - формулы (12) и (13).

Максимальное значение обеих характеристик будет достигаться в случае, если среда является АЧТ при соответствующей температуре:

$$\boxed{|\varepsilon_R(\mathbf{r}, t)|_{\max} = \frac{1}{c}\int_0^{\infty}\left[\int_{(4\pi)} I(\nu, \mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}, t)\, d\boldsymbol{\Omega}\right] d\nu = \frac{4\pi}{c}\int_0^{\infty} B(\nu, T(\mathbf{r}, t))\, d\nu = \frac{4\pi}{c}\frac{\sigma}{\pi}T^4,} \quad (14)$$

$|\varepsilon_R(\vec{r}, t)|_{max} \approx 7{,}6 \cdot 10^{-15}(T, K)^4$ (15). Сравним (15) с характерным значением внутренней энергии $\boldsymbol{U = 3/2nkT}$

Оценку проведём для нормальных условий, характерных для земной атмосферы, и минимально возможных значениях скорости |**v**|. T ≈ 300 K, n = L ~= 2,67 · 10^{19} см−3 — число Лошмидта; U ≈ 10^6 эрг/см3, а для |εR|max ≈ 10^{-4}эрг/см3. Таким образом, при нормальных условиях для земной атмосферы, а также вплоть до высот ~ 10 км вкладом энергии излучения в баланс полной энергии можно практически пренебречь. В то же время, оценивая |**q**R|max как произведение |εR|max · |**v**f| ≈ |εR|max · c ≈ 3 · 10^6 эрг/см2 · с, а поток переноса тепловой энергии как произведение U · |**v**|min (|**v**|min —минимальное значение скорости ЭФО рассматриваемой среды, в качестве которого можно взять *минимальное* значение существенных турбулентных пульсаций в земной атмосфере, например, |**v**|min ~ 1 см/с), получим для |**q**| ~ 10^6 эрг/см2 · с, что сопоставимо с |**q**R|max.