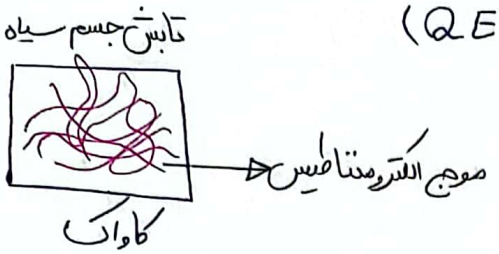
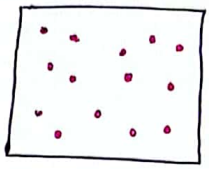
* فوتون‌ها : گاز فوتونی

(نظریه QED)

ذات کوانتومی ← فوتون





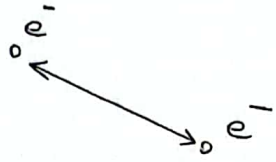
$m_0 = 0$

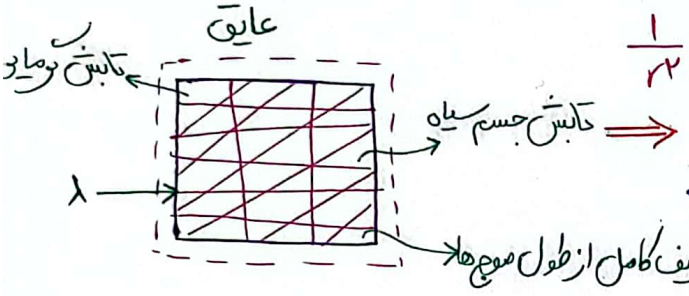
سرعت $\Leftarrow C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$

$\Rightarrow 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$

فوتون $m_0 = 0$

واسطه نیروی الکترومغناطیسی بر هم





$\frac{1}{3}$ به تعادل رسیده شده‌ی یک موج الکترومغناطیس است.

تعادل ترمودینامیکی

* نکته : فشار یک سوم چگالی انرژی است و این بیشترین فشار ممکن طبیعی است.

دو ماده‌ی نور و قوا دارای بیشترین و کمترین فشارند.

$U = \frac{U}{V} = \underbrace{\hbar\omega}_{\text{انرژی فوتون‌ها}} n \longrightarrow$ چگالی تعداد

انرژی در واحد حجم

$$P = \frac{1}{3} n m \langle v^2 \rangle = \frac{1}{3} n m c^2 = \frac{1}{3} n E = \frac{1}{3} n \hbar\omega = \frac{1}{3} u$$

چگالی انرژی (u)

معادله حالت فوتون‌ها

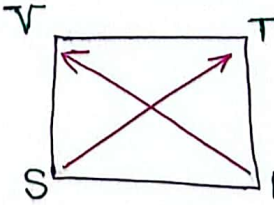
قانون اول ترمودینامیک

$$dU = TdS - PdV$$

$$u = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T - P =$$

$$T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P = \frac{1}{3} T\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V - \frac{1}{3} u$$

$$4U = T\frac{dU}{dT} \Rightarrow \int 4\frac{dT}{T} = \int \frac{du}{u}$$



چگالی انرژی برای فوتون‌ها با توان ۴ دما ارتباط دارد.

$4\ln T = \ln u \longrightarrow u = AT^4$

شار تعداد فوتون ها $\Phi = \frac{1}{4}nc$

قانون استفان بولتزمن — ثابت استفان بولتزمن

شار انرژی فوتون $P = \hbar\omega\,\Phi = \frac{1}{4}nc\hbar\omega = \frac{1}{4}cu = \boxed{\frac{1}{4}AC}\,T^4 \Rightarrow \boxed{P = \sigma T^4}$

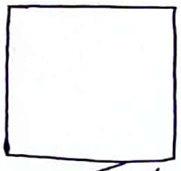
$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \frac{W}{m^2 K^4}$

✓ طول موج: λ

✓ بسامد زاویه‌ای: $\omega \leftarrow \omega = 2\pi\nu$ ، $\omega k = C$

✓ بسامد: $\nu \leftarrow \lambda\nu = c$

✓ عدد موج: $k \leftarrow k = \frac{2\pi}{\lambda}$



کاواک

$u_\lambda d\lambda \quad \lambda, \lambda + d\lambda$

$u = \int u_\lambda d\lambda = \int u_\omega d\omega = \int u_k dk$

طیف جذبی: α_λ

طیف گسیل: e_λ

$\left(\frac{c}{4}u_\lambda d\lambda\right)\alpha_\lambda = e_\lambda d\lambda$

* جسمی که خوب گسیل می‌کند خوب هم جذب می‌کند و برعکس.

$\frac{e_\lambda}{\alpha_\lambda} = \frac{c}{4}u_\lambda$

* گاز فوتونی (می‌دانیم فوتون‌ها رفتارشان مثل نوسانگر هماهنگ ساده است)

شار انرژی فوتون‌ها $P = \hbar\omega\,\Phi = \frac{1}{4}nc\hbar\omega$

$= \frac{1}{4}uc = \frac{1}{4}AcT^4$

$U = \hbar\omega\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{e^{\beta\hbar\omega} - 1}\right)$

$g(k)dk = \frac{4\pi k^2 dk}{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3}$

* برای ذرات بدون جرم دوتا قطبش و دوتا اسپین (ضطراب) دارند و این اسپین برای فوتون ۲ است.

$g(k)dk = \frac{4\pi k^2 dk}{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3} \times 2 = \frac{2k^2 dk}{2\pi^2}$ ، $g(\omega)d\omega = \frac{2\omega^2 d\omega}{\pi^2 c^3}$

$U = \int_0^\infty g(\omega)\hbar\omega\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{e^{\beta\hbar\omega} - 1}\right)d\omega = \int_0^\infty \frac{2\omega^2}{\pi^2 c^3}\hbar\omega\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{e^{\beta\hbar\omega} - 1}\right)d\omega$

CamScanner

$$U = \frac{V\hbar}{\pi^2 c^3}\left(\frac{1}{2}\underbrace{\int_0^\infty \omega^3 d\omega}_{\infty} + \underbrace{\int_0^\infty \frac{\omega^3 d\omega}{e^{\beta\hbar\omega}-1}}_{x=\hbar\beta\omega}\right) = \infty + \frac{V\hbar}{\pi^2 c^3}\left(\frac{1}{\hbar\beta}\right)^4 \boxed{\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1}} = \frac{\pi^4}{15}$$

انرژی نقطه صفر

$$\infty + \left(\frac{V}{15}\frac{\pi^2 k_B^4}{c^3\hbar^3}\right)T^4$$

$\to 0.47 \times 10^{-8} = 6$

Renormalization = بازبهنجارش