

Стандартная модель — проблемы.

* нейтринные осцилляции $\rightarrow m_\nu$

[* 16% от крит. энерг. ν — Наше ν - ν
Темная материя

* Барьонная асимметрия

Космология

* Вселенная расширяется $a(t)$

$$H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$$

* Вселенная — изотропная, однородная и плоская.

$$ds^2 = \boxed{g_{\mu\nu}} dx^\mu dx^\nu = dt^2 - a^2(t) d\vec{x}^2$$

$\downarrow$
в ОТО
динамич. полг.

$$\frac{\delta T_\nu(\vec{x})}{T} \sim 10^{-4}$$

* Ур-е Эйнштейна $\rightarrow$ следствие для
однородной и изотр. Вселенной

$$\boxed{k=c=1}$$

$$\left\{ \begin{aligned} H^2 &= \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \\ \dot{\rho} + 3H(\rho + p) &= 0 \end{aligned} \right. \quad \rho, p$$

$$p = p(\rho)$$

Примеры.

1.) Нерелятив. вещество — "пыль"

$$\dot{\rho} + 3H\rho = 0$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 \sim \frac{1}{a^3}$$

$$H \sim \frac{1}{t}$$

$$\frac{\dot{\rho}}{\rho} = -3 \frac{\dot{a}}{a} \Rightarrow \frac{\dot{a}}{a} \sim \frac{1}{a^{3/2}}$$

$$\rho \propto \frac{1}{a^3}$$

$$a^{3/2} \sim t$$

$$\rho a^3 = \text{const}$$

$$a \sim t^{2/3}$$

2) Переход к нулю

$$p = \frac{1}{3} \rho \Rightarrow$$

$$\dot{\rho} + 4H\rho = 0$$

$$\frac{\dot{\rho}}{\rho} + 4\frac{\dot{a}}{a} = 0$$

$$\rho \sim \frac{1}{a^4}$$

$$\left(\frac{\ddot{a}}{a}\right)^2 \sim \frac{1}{a^4}$$

$$\frac{\dot{a}}{a} \sim \frac{1}{a^2}$$

$$a \sim t^{1/2}$$

$$H \sim \frac{1}{t}$$

$$\boxed{H \sim \frac{1}{a^2}}$$

$$\begin{aligned} \left(T \frac{dS}{dt} \right) &= \frac{dE}{dt} + p \frac{dV}{dt} \sim \frac{d}{dt} (\rho a^3) + p \frac{da^3}{dt} = a^3 \frac{d\rho}{dt} + (\rho + p) 3a^2 \dot{a} \\ \frac{d\rho}{dt} + 3 \frac{\dot{a}}{a} (\rho + p) &= 0 \end{aligned}$$

$$(\rho a^3) = \text{const}$$

* Уравнение Фридмана.

$$H_0^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)_0^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_c$$

$$\rho_0 = \rho_c \simeq 0.5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$$

Λ CDM.

H_0, t_0

$$\rho_{\text{рад}} \sim \frac{1}{a^4}$$

$$\rho_{\text{мат}} \sim \frac{1}{a^3}$$

* "Вакуум"

$$p = -\rho$$

$$\frac{d\rho}{dt} + 3H(\rho + p) = \frac{d\rho}{dt} = 0$$

$$\rho = \text{const} \Rightarrow a(t) \propto e^{\frac{2}{3} \text{const} t}$$

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_c \left(\Omega_\Lambda + \underbrace{\Omega_{\text{рад}} \left(\frac{a_0}{a}\right)^4}_{\text{}} + \underbrace{\Omega_{\text{мат}} \left(\frac{a_0}{a}\right)^3}_{\text{}} + \underbrace{\Omega_{\text{крит}} \left(\frac{a_0}{a}\right)^2}_{\text{}} \right)$$

$$\Omega_{\text{mat}} \simeq 0.315$$

$$\Omega_{\Lambda} \simeq 0.685$$

$$\Omega_{\text{rad}} \simeq 10^{-4}$$

$$|\Omega_{\text{крив.}}| \lesssim 0.01$$

* Вселенная была разогрета до $T \sim 1 \text{ МэВ}$ ←
 Нуклеосинтез. — легкие элементы.

* $f(\vec{x}, \vec{p}, t) \xrightarrow[\text{изотропия}]{\text{однор.}}$ $f(|\vec{p}|, t)$

В равновесии

$$f(|\vec{p}|) \approx \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{T}} \pm 1}$$

перен.
и веден $e^{-\frac{E-\mu}{T}}$

$$n_i = g_i \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} f_i(|\vec{p}|, t)$$

$$\rho_i = g_i \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} E(p) f_i(|\vec{p}|, t)$$

Перенос. сумм

$$g_i = \begin{cases} g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 & - \text{б.э} \\ g_i \frac{7}{8} \frac{\pi^2}{30} T^4 & - \text{Ф.Ф.} \end{cases}$$

Перенос. вел-во

$$S = \frac{g+p}{T} = \frac{4}{3} \frac{g}{T}$$

Полная плотность энергии.

$$g = g_* \frac{\pi^2}{30} T^4$$

$$S = g_*^S \frac{2\pi^2}{45} T^3$$

$$n_i = \begin{cases} g_i \frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3 \\ g_i \frac{3}{4} \frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3 \end{cases}$$

$$n_i = \left(\frac{m_i T}{2\pi} \right)^3 e^{-\frac{m_i - \mu}{T}}$$

Результат g_* при $T \gg 172 \text{ Гб}$ 2/3

$$g_* = \sum_{\substack{\text{боз} \\ m < T}} g_i \left(\frac{T_i}{T} \right)^4 + \sum_{\substack{\text{ферм} \\ m < T}} \frac{7}{8} g_i \left(\frac{T_i}{T} \right)^4$$

$$g_*^S = \sum_{\substack{\text{боз} \\ m < T}} g_i \left(\frac{T_i}{T} \right)^3 + \sum_{\substack{\text{ферм} \\ m < T}} \frac{7}{8} g_i \left(\frac{T_i}{T} \right)^3$$

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho = \parallel \text{рад. домин. стадия} \parallel =$$

$$= \frac{8\pi}{3 M_{Pl}^2} g_* \frac{\pi^2}{30} T^4$$

$$\Rightarrow H = \frac{T^2}{M_{Pl}^*} = \frac{\dot{a}}{a}$$

рад. домин. стадия.

$$H \sim \frac{1}{\underline{a^2}}$$

$$M_{Pl}^* = \frac{M_{Pl}}{1.66 \sqrt{g_*}}$$

$$T(t) \sim \frac{1}{a(t)}$$

② $\frac{1}{3}$ Оценки
возраст
Вселенной
на момент
 $T \sim 1 \text{ МсВ.}$

Темная материя

* Взаим. гравитационно

* $\tau_{DM} \gtrsim 14$ млрд лет.

* очень слабо в-ет с e, p, γ

* реликт. излучение. — Т.М. должна быть в эпоху рекомбинации.

* $10^{-22} \text{ эВ} \lesssim m_\chi \lesssim 10^5 M_\odot$
бозоны.

$1 \text{ кэВ} \lesssim m_\chi$

* Холодн. Т.М — выходит из раби — не реалист.

* Тепл и горяч. Т.М — разрешена
горяч. Т.М. — запрещена. $m_\chi \gtrsim 1 \text{ кэВ}$

* локальная
 $\rho_\chi \simeq 0.4 \frac{\text{ГэВ}}{\text{см}^3}$

Галактика
 $R \sim 1 \text{ кпс}$
 $M \sim 10^5 M_\odot$
 $m_\chi > ?$

$$\left(\frac{d}{dt} (n_\chi a^3) = 0 \right)$$

$$f(|\vec{p}|, t)$$

$$\dot{n}_\chi + 3H n_\chi = 0$$

$$\frac{d}{dt} f = 0 \rightarrow$$

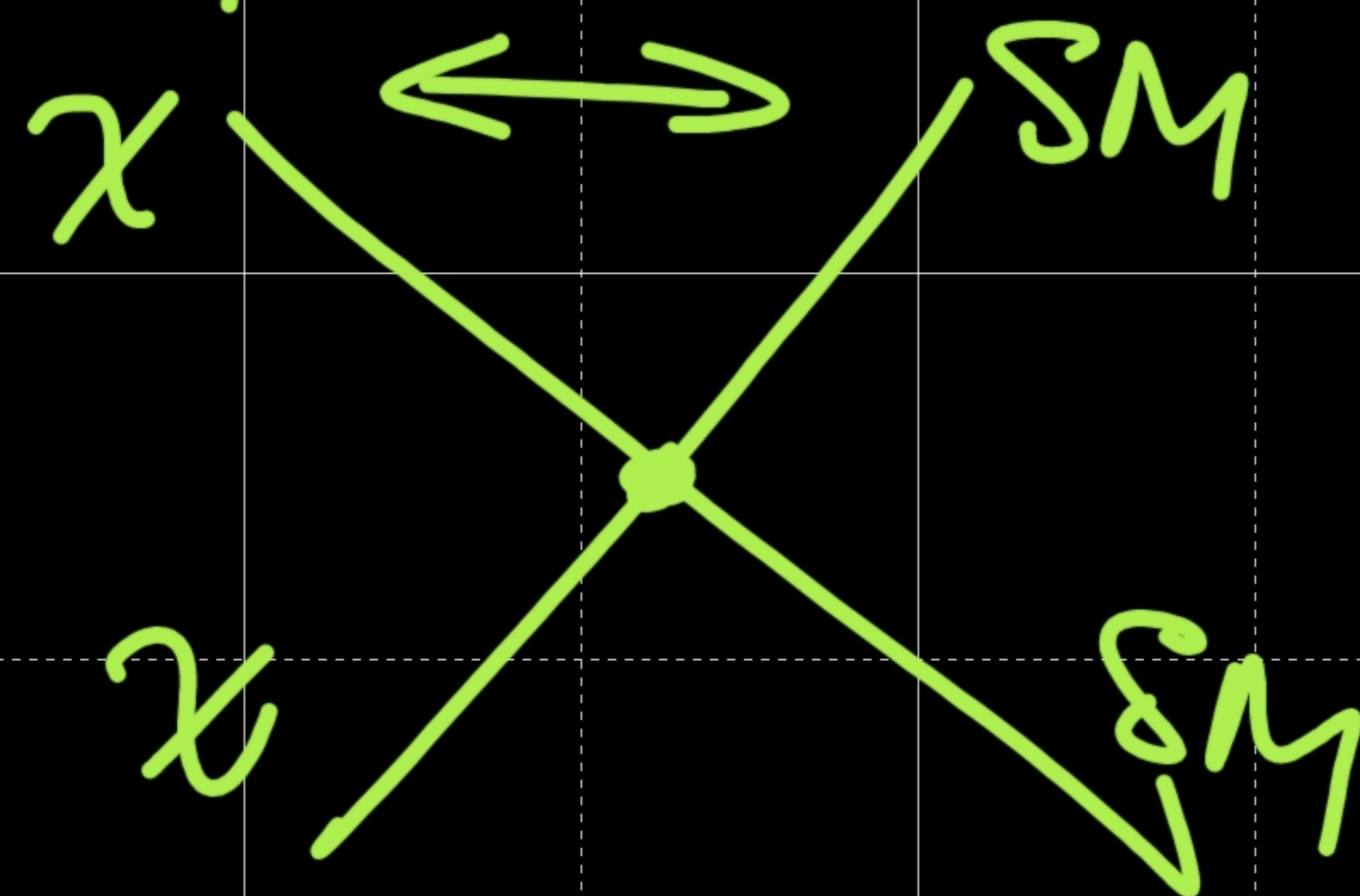
$$\frac{2}{3}$$

$$\otimes \chi + \chi \leftrightarrow SM + SM$$

$$\chi + SM \leftrightarrow \chi + SM$$

$$\dot{n}_\chi + 3H n_\chi = - \langle \sigma \bar{\sigma} \rangle n_\chi^2 + \langle \sigma \bar{\sigma} \rangle (n_\chi^{eq})^2$$

$$\dot{n}_\chi + 3H n_\chi = - \langle \sigma \bar{\sigma} \rangle (n_\chi^2 - (n_\chi^{eq})^2)$$



$$\frac{d}{dt}(\epsilon a^3) = 0$$

$$\dot{S} + 3HS = 0$$

$$Y_x = \frac{n_x}{S}$$

$$\left[\frac{dY_x}{dt} \right] = - \frac{\langle \sigma \sigma \rangle}{S} (n_x^2 - n_x^{eq^2}) =$$

$$= - \langle \sigma \sigma \rangle S (Y_x^2 - Y_x^{eq^2})$$

$$t \rightarrow a \rightarrow T \rightarrow x \equiv \frac{m_x}{T}$$

$$\frac{\dot{a}}{a} = H$$

$$dt = \frac{da}{aH} = - \frac{dT}{TH} \quad \text{as } T \rightarrow 0$$

$$\Rightarrow \frac{dx}{xH}$$

$$dt = \frac{dx}{xH}$$

$$\frac{dx}{x} = - \frac{dT}{T}$$

$$T \sim \frac{1}{a}$$

$$\frac{dT}{T} = - \frac{da}{a}$$

$$\frac{dY}{dx} = - \frac{\langle \sigma \sigma \rangle}{xH} S Y_x^{eq^2} \left(\left(\frac{Y_x}{Y_x^{eq}} \right)^2 - 1 \right)$$

$$\frac{x}{\gamma_{eq}^x} \frac{d\gamma_x}{dx} = - \frac{\Gamma_{анн}}{H} \left(\left(\frac{\gamma_x}{\gamma_{eq}^x} \right)^2 - 1 \right)$$

$$\frac{\Gamma_{анн}}{H} = \langle \sigma \bar{\sigma} \rangle n_x^{eq} \quad \text{— скорость аннигиляции}$$

скор. расш. Вселенной.

$$\frac{\Gamma_{анн}}{H} \gg 1 \quad \text{или высоких } T. \quad \gamma_x = \gamma_{eq}^x$$

$$\Gamma_{анн} = \underbrace{\langle \sigma \bar{\sigma} \rangle n_x^{eq}}_{\gamma_x} = \langle \sigma \bar{\sigma} \rangle \underbrace{\left(\frac{m_x T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_x}{T}}}_{e^{-x}}$$

γ_x начинает отличаться от γ_{eq}^x

$$\frac{x}{Y_x^{eq}} \frac{dY_x}{dx} = - \frac{\Gamma_{ann}}{H} \left(\left(\frac{Y_x}{Y_x^{eq}} \right)^2 - 1 \right)$$

$$Y_x = Y_x^{eq} + \delta Y_x$$

$$Y_x^{eq} = \frac{n_x^{eq}}{s} \sim x^{\frac{3}{2}} e^{-x}$$

$$\left(\frac{mT}{2\pi} \right)^{3/2} e^{-\frac{m}{T}} \quad \langle \sigma \sigma \rangle = \sigma_0$$

$$\frac{x}{Y_x^{eq}} \left(\frac{dY_x^{eq}}{dx} + \frac{d\delta Y_x}{dx} \right) = - \frac{\Gamma_{ann}}{H} \left(\frac{2\delta Y_x}{Y_x^{eq}} + \frac{\delta Y_x^2}{(Y_x^{eq})^2} \right) \quad \left(\text{when } x \ll 1 \right)$$

$$\delta Y_x = \frac{x}{2} \frac{H}{\Gamma_{ann}} Y_x^{eq} \sim \frac{1}{x} Y_x^{eq}$$

$$x_f = \left(\frac{\Gamma_{ann}}{H} \right)_f$$

— момент freeze-out
'вымораживания'

$$x_f = \left(\frac{\Gamma_{ann}}{H} \right)_f = \frac{\sigma_0 n_{\chi}^{eq}(x_f)}{H(x_f)} = \underbrace{\frac{\sigma_0 \left(\frac{m_{\chi} T_f}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-x_f}}{T_f^2}}_{f(q,p)} M_{pe}^*$$

$$\xrightarrow{\langle out | s | in \rangle} \frac{m_{\chi} M_{pe}^* \sigma_0}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{x_f}} = e^{x_f}$$

В главном лог. приближении

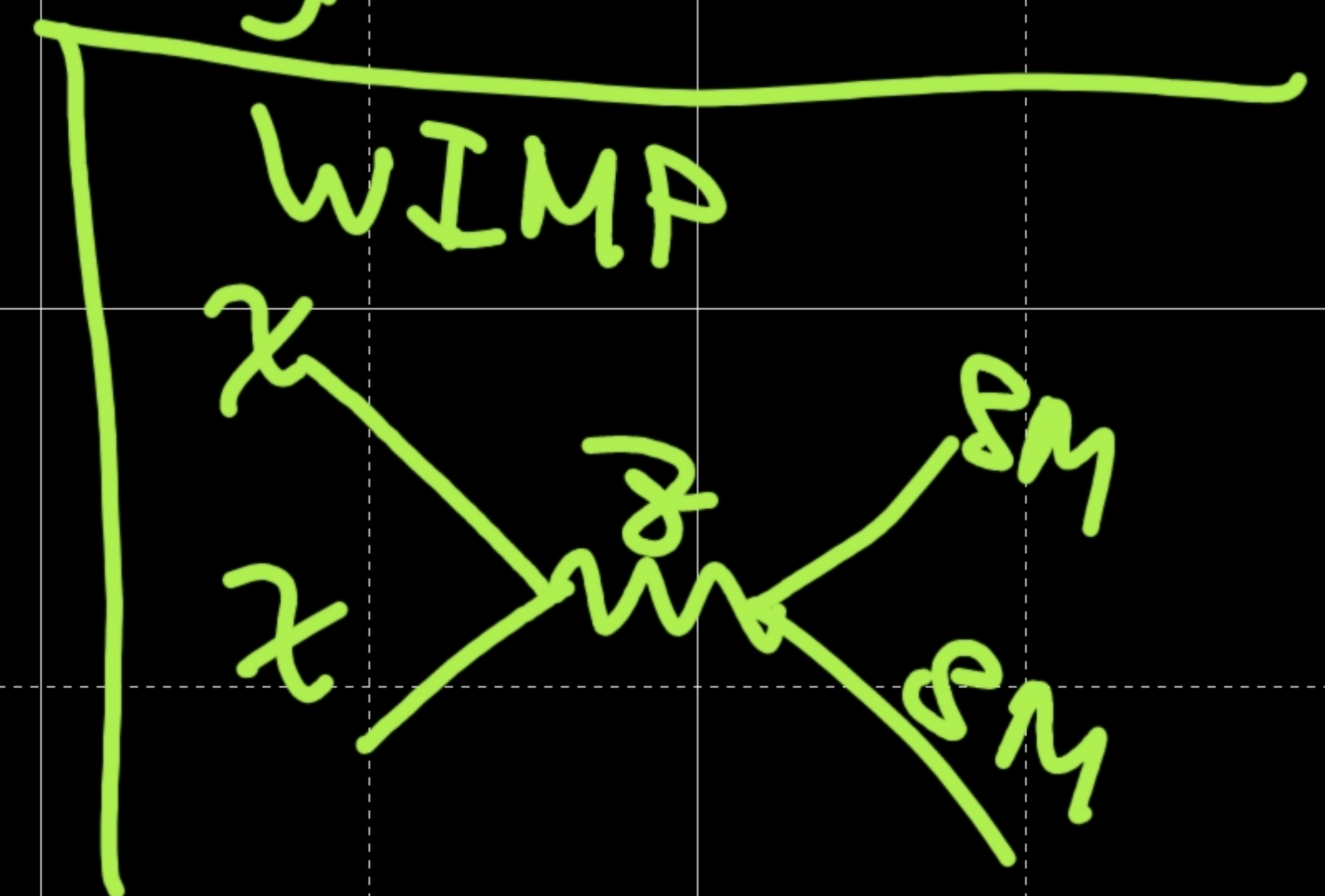
$$\underbrace{\langle \psi | D(t) | \psi \rangle}_x \quad x_f = \ln \left[\frac{m_{\chi} M_{pe}^* \sigma_0}{(2\pi)^{3/2}} \right]$$

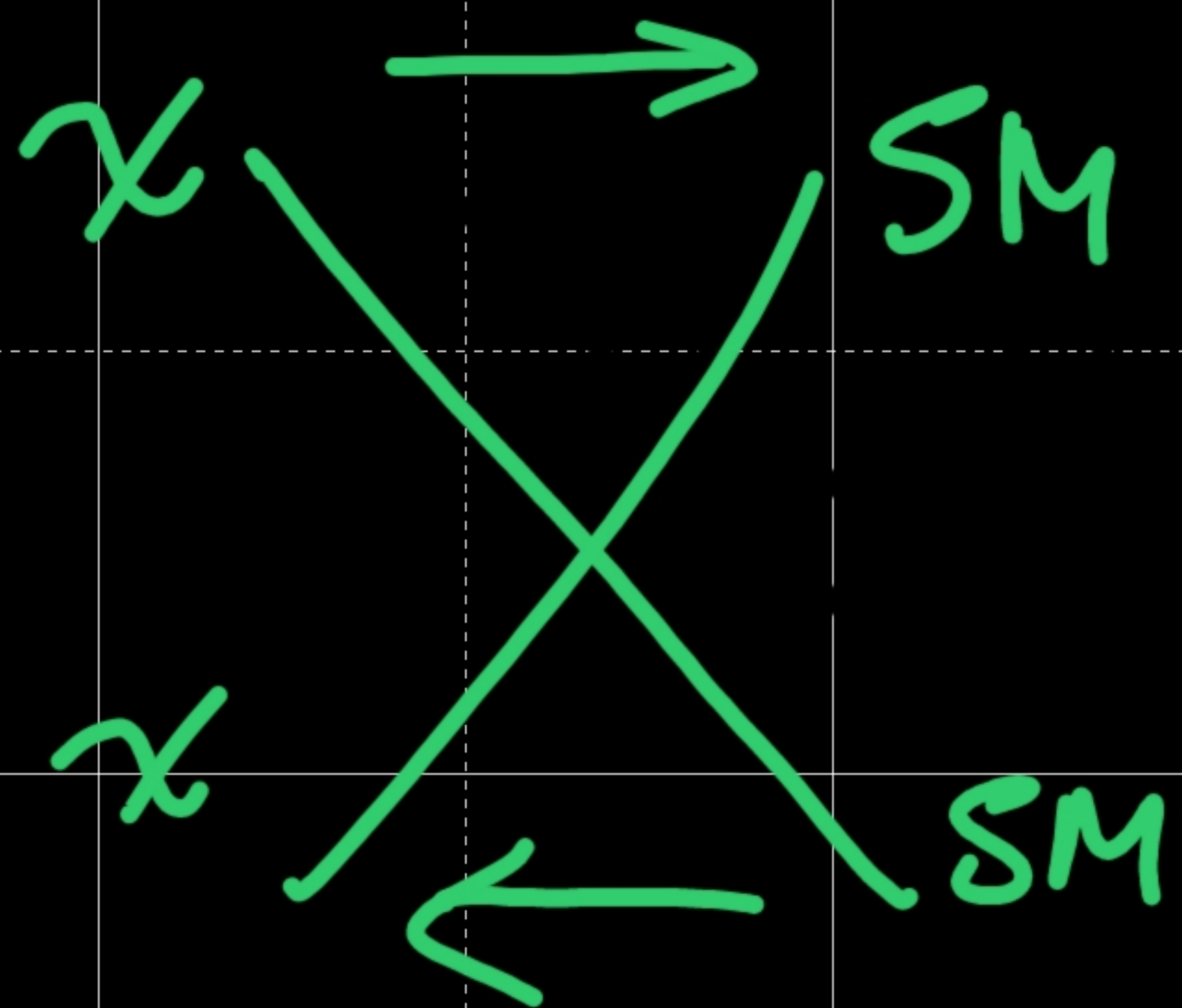


$$\left(\frac{m_{\chi}}{T_f} e^{-x} \right)$$

$$\left(x_f \sim 30 \right) \quad x_f = \frac{m_{\chi}}{T_f} \quad \hat{U} \hat{\rho} \hat{U}^{-1}$$

$$\langle \sigma v \rangle = \sigma_0$$





$$\langle \sigma_{ann} \bar{\nu} \rangle = \sigma_0$$

$$\Gamma_{ann} = H$$

$$x_f$$

$$\rightarrow h$$

$$x_f = \frac{\Gamma_{ann}}{H}$$

$$x \ll 1$$

$$x \approx 0$$

$$x = 0$$

$$x_f$$

$$Y_x^{eq}(x)$$

$$Y_x^{eq}(x)$$

$$Y_x = \frac{n_x}{s}$$

$$\frac{x}{Y_x^{eq}} \frac{dY_x}{dx} = -$$

$$\Gamma_{ann} = \langle \sigma_{ann} \bar{\nu} \rangle n_x^{eq}$$

$$Y_x = Y_x^{eq}$$

$$\delta Y_x \approx \frac{1}{2} Y_x^{eq}$$

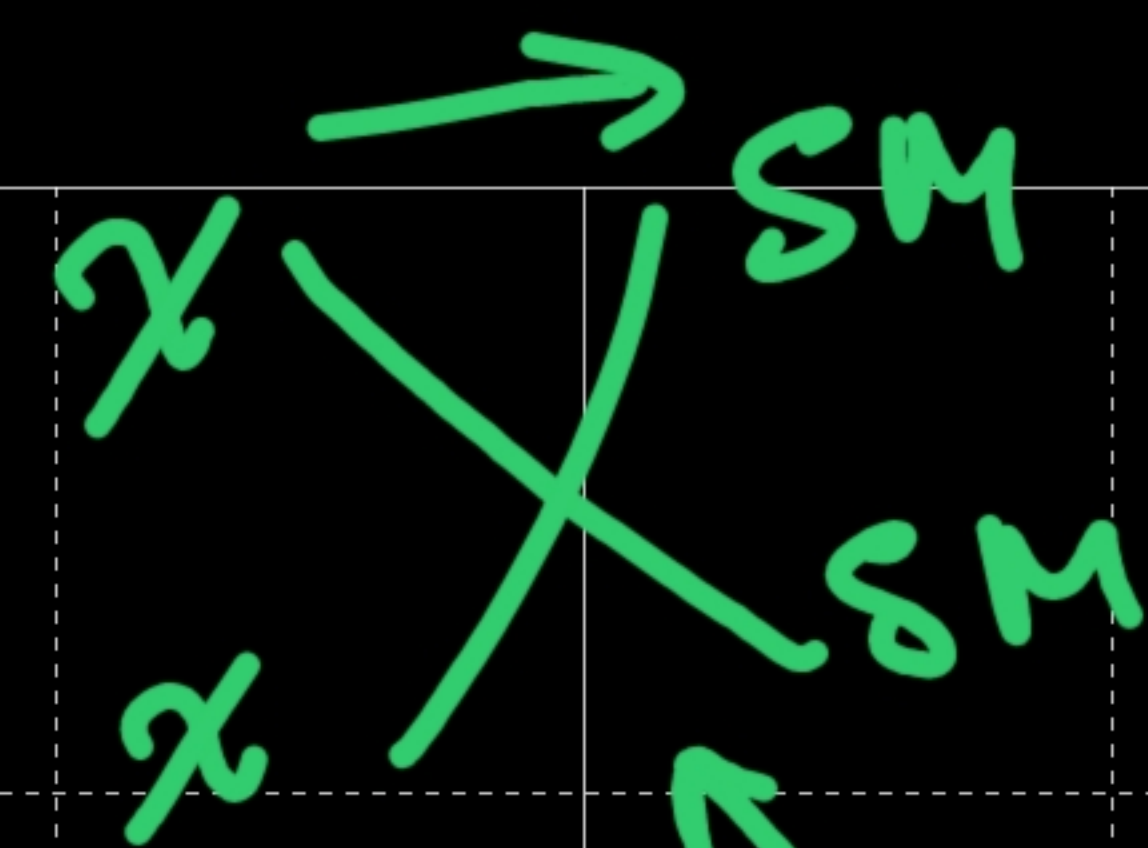
$$Y_x^{eq}(x) \sim x^{\frac{3}{2}} e^{-x}$$

$$Y_x^{eq}(x) \rightarrow \text{const}$$

$$\ln Y_x$$

$$Y_x^{eq}(x)$$

$$x$$



$$\frac{\Gamma_{ann}}{H} \left(\frac{Y_x^{eq}}{Y_x^{eq}} - 1 \right)$$

$$x = \frac{m_x}{T}$$

$$x_f = \ln \left[\frac{g_x m_x M_{pe}^4 \sigma_0}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{x_f}} \right]$$

$$x_f \gg 1$$



фронт

от $x = x_f$ до $x = \infty$

$$\frac{x}{Y_x^{eq}} \frac{dY_x}{dx} = - \frac{\Gamma_{ann}}{H} \frac{Y_x^2}{Y_x^{eq2}}, \quad \left[Y_x \right]_{x=x_f} = Y_x^{eq}$$

$$\frac{dY_x}{Y_x^2} = - \frac{\Gamma_{ann}}{x H Y_x^{eq}} dx = \left\| \Gamma_{ann} = \sigma_0 n_x^{eq} \right\| =$$

$$= - \frac{\sigma_0 \cancel{n_x^{eq}} S}{x H \cancel{n_x^{eq}}} dx = - \frac{1}{Y_x^{eq}(x_f)} \frac{x_f^2}{x^2} dx$$

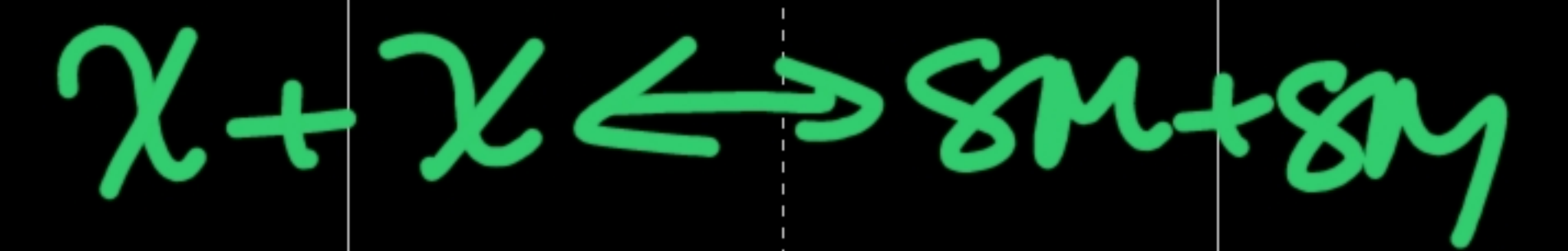
$$\left[Y_x^{eq} \right]_{x=x_f} = \left\| x_f = \left(\frac{\Gamma_{ann}}{H} \right)_{x_f} = \frac{\sigma_0 n_x^{eq}(x_f)}{H(x_f)} \right\| = \frac{x_f H(x_f)}{\sigma_0 S(x_f)}$$

$$\frac{\sigma_0 S}{x H} \sim \left\| \frac{x^2}{x \cdot x^3} \right\| \sim \frac{1}{x^2} \left\| = \frac{\sigma_0 T_x^2}{x T_x^2 M_{Pe}^*} \sim \frac{1}{x^2} \right\|$$

$$\frac{dY_x}{Y_x^2} = - \frac{X_f^2}{Y_x^{eq}(x_f)} \frac{dx}{x^2}$$

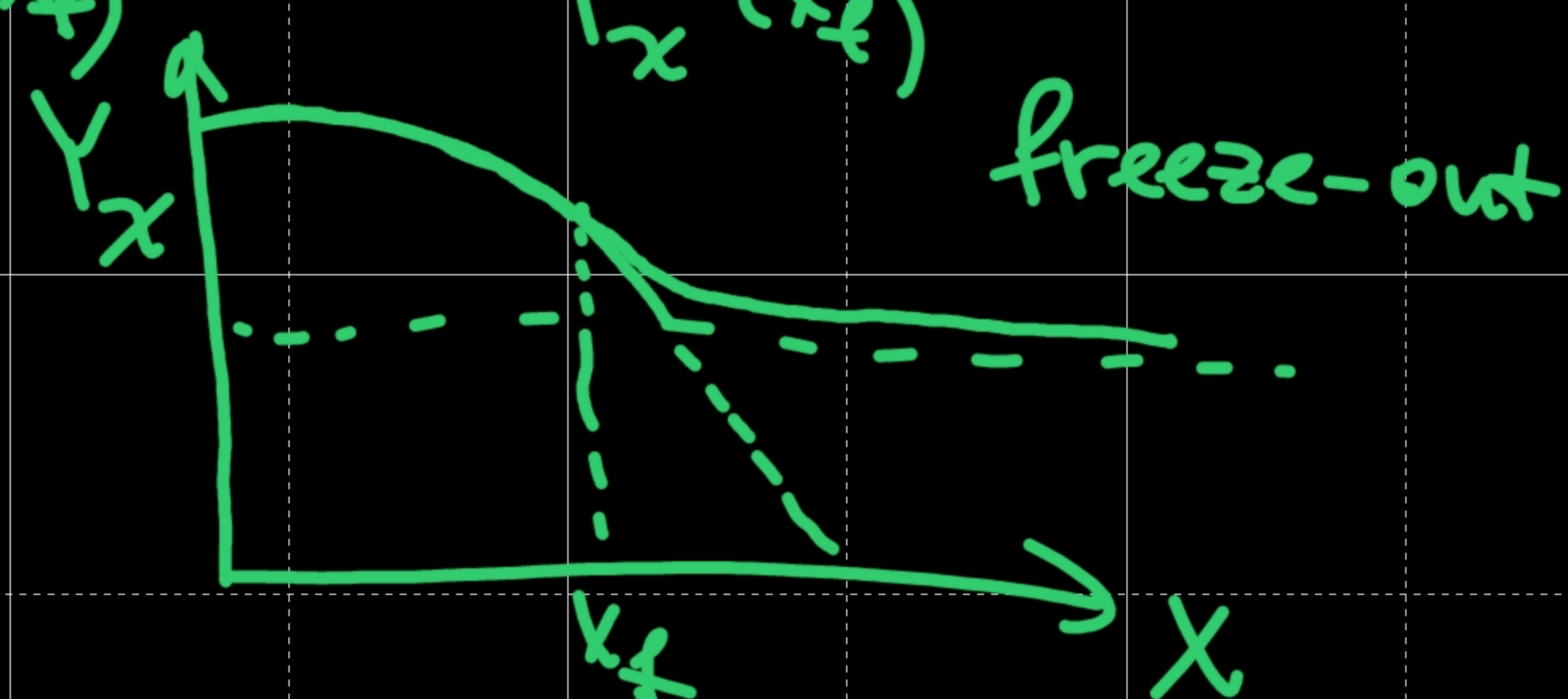
- unternehmen von $X_f \rightarrow 0$ bis ∞

$$- \left(\frac{1}{Y_x(\infty)} - \frac{1}{Y_x(x_f)} \right) = \frac{X_f^2}{Y_x^{eq}(x_f)} \left(- \frac{1}{x_f} \right)$$



$$\frac{1}{Y_x(\infty)} = \frac{1}{Y_x^{eq}(x_f)} + \frac{X_f}{Y_x^{eq}(x_f)} \approx \frac{X_f + 1}{Y_x^{eq}(x_f)}$$

$$Y_x(\infty) = \frac{Y_x^{eq}(x_f)}{X_f + 1}$$



$$\Omega_\chi = \frac{\rho_\chi}{\rho_c} = \frac{m_\chi n_{\chi,0}}{\rho_c}$$

$$= \frac{m_\chi s_0}{\rho_c} \frac{Y_x^{eq}(x_f)}{x_f + 1} \quad \textcircled{=}$$

$$Y_x^{eq}(x_f) = \frac{x_f H(x_f)}{s_0 S(x_f)} = \frac{x_f^2 45}{s_0 g_*^2 2\pi^2 x_f^3 M_{pe}^* m_\chi}$$

$$\textcircled{=} \frac{m_\chi s_0}{\rho_c} \cdot \frac{45 x_f^2 1.66 \sqrt{g_*}}{s_0 2\pi^2 g_*^2 m_\chi M_{pe} (x_f + 1)}$$

$$\Omega_x = \frac{s_0}{s_c} \frac{45 x_f 4.66 \sqrt{g_x}}{2\pi^2 g_x^S \sigma_0 M_{Pl}^*} = \left(\frac{T_{x,0}}{T_{\gamma,0}} \right)^3$$

$$s_0 = \frac{2\pi^2}{45} \left(2 + \frac{7}{8} 2.3 \left(\frac{4}{11} \right) \right) T_{x,0}^3 \simeq 2.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$m_x \simeq 100 \text{ ГэВ}$$

$$\alpha \simeq \frac{1}{30}$$

$$x_f \simeq 27$$

$$\Omega_x \simeq$$

$$1.2 \cdot 10^{-9} \text{ ГэВ}^{-2}$$

$$\simeq 0.265$$

$$\langle \sigma v \rangle \simeq \sigma_0 \simeq \frac{\alpha^2}{m_x^2}$$

WIMP

$$\sigma_0 \simeq 4.5 \cdot 10^{-9} \text{ ГэВ}^{-2}$$

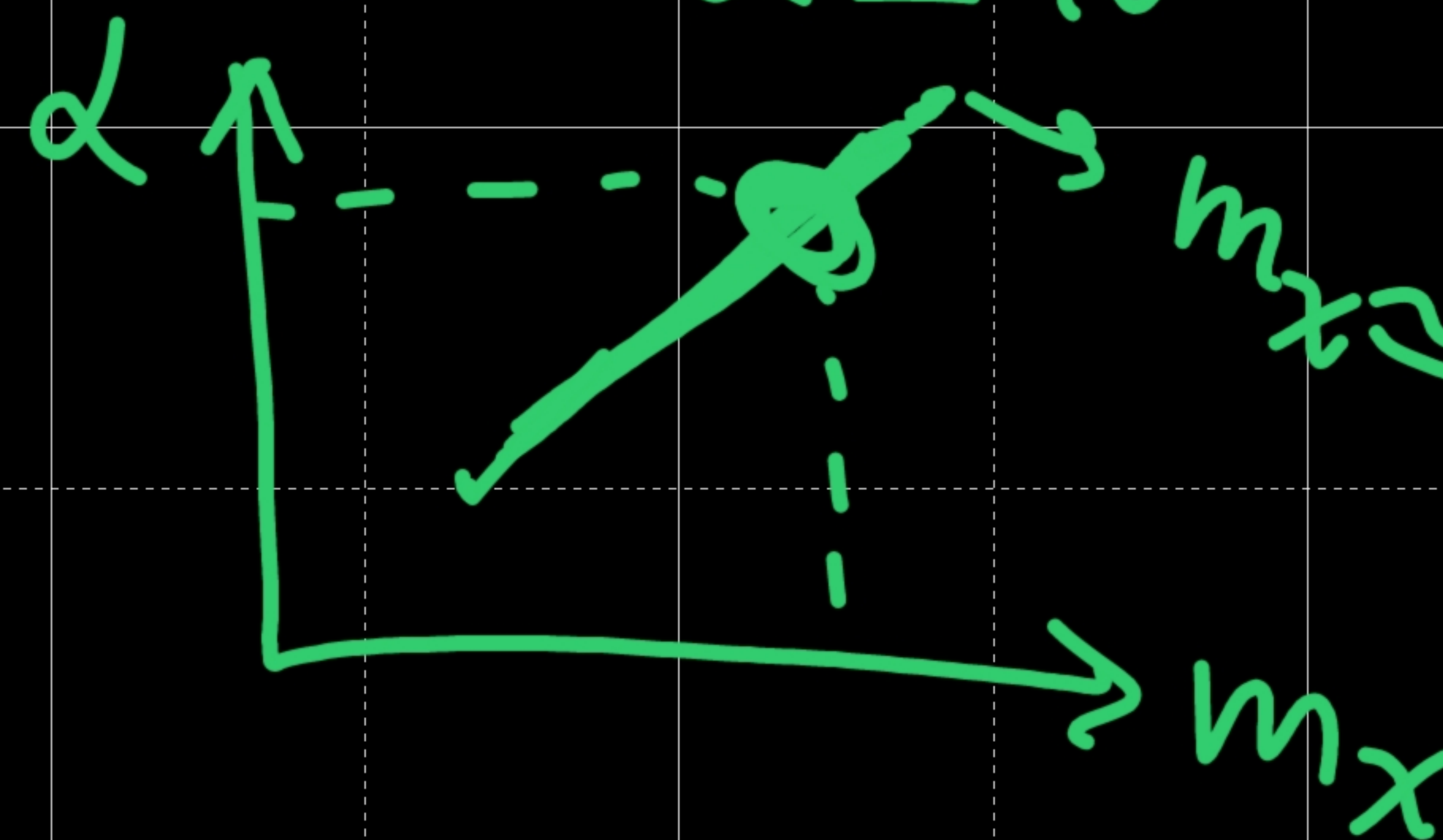
$$= 5.7 \cdot 10^{-26} \frac{\text{cm}^3}{c}$$

$$(\text{правильно} \simeq 3 \cdot 10^{-26} \frac{\text{cm}^3}{c})$$

$$m_x \simeq 100 \text{ ГэВ}$$

$$\alpha \simeq 10^{-2}$$

$$\frac{\alpha^2}{m_x^2}$$



$$\text{Если } m_x \simeq 1 \text{ МэВ} \\ \alpha = 10^{-8}$$

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \frac{1}{2}(\partial_\mu S)^2 - \frac{m^2}{2}S^2 - \frac{\lambda}{4}S^4 - \underline{\lambda_{HS}} S^2 H^\dagger H$$

$\sum_{\text{Z-symmetric}} S \rightarrow S$
 1) Параметры m^2, λ_{HS} ($10 - 10^3 \text{ ТэВ}$)
 2) $\sigma_{\chi\chi} \lesssim 10^{-47} - 10^{-48} \text{ см}^2$

считать
 $\lambda \ll 1$
 самодействием S
 пренебречь

$\langle \sigma\sigma \rangle$

$$1+2 \leftrightarrow 3+4$$

$$\dot{n}_1 + 3Hn_1 = -\langle \sigma\sigma \rangle n_1 n_2 + \dots$$

$$\rightarrow \int d\Phi_1 d\Phi_2 d\Phi_3 d\Phi_4 (2\pi)^4 \delta^{(4)}(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) |M_{12 \rightarrow 34}|$$

$$d\Phi = \frac{d^3 p}{(2\pi)^3 2E}$$

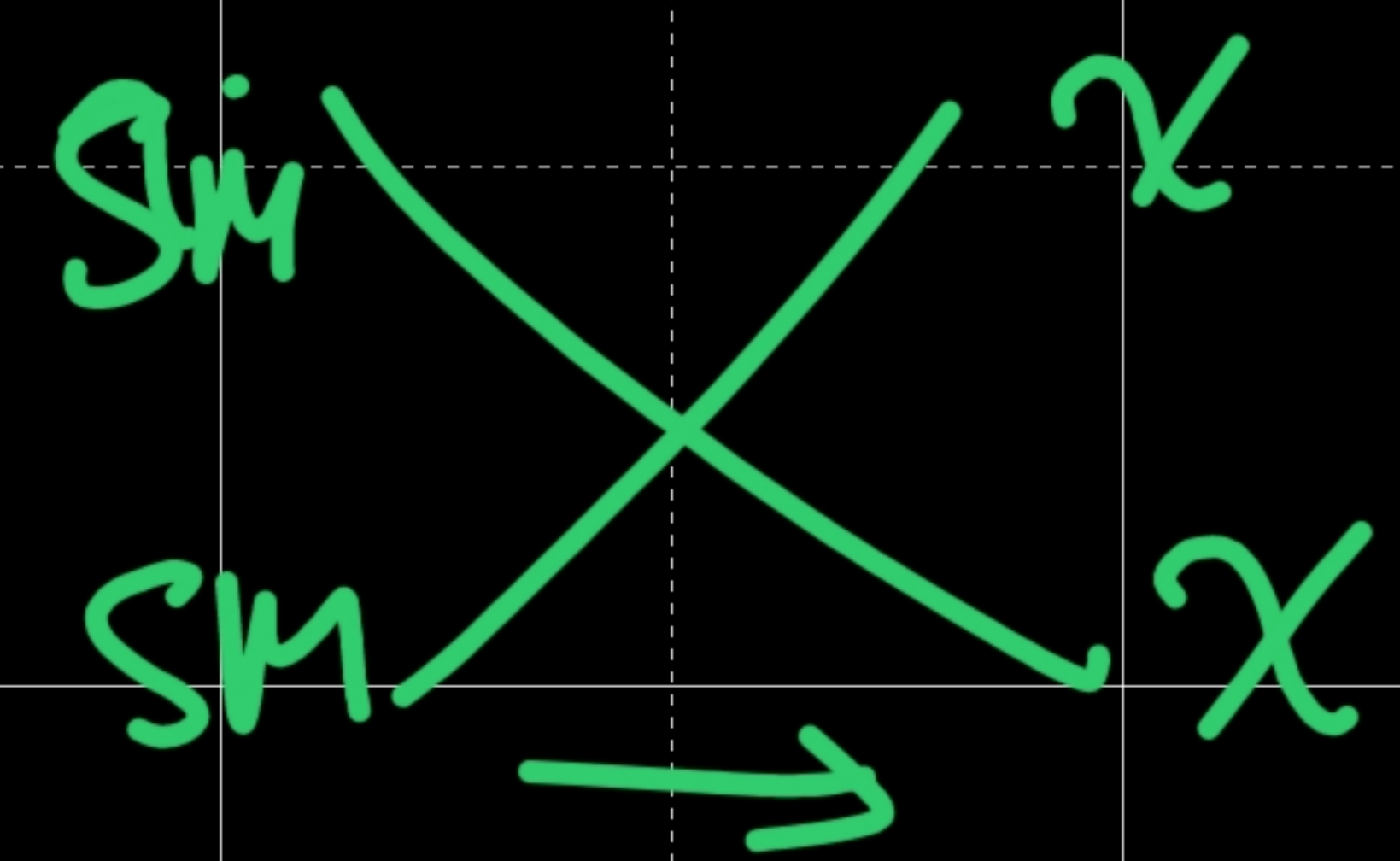
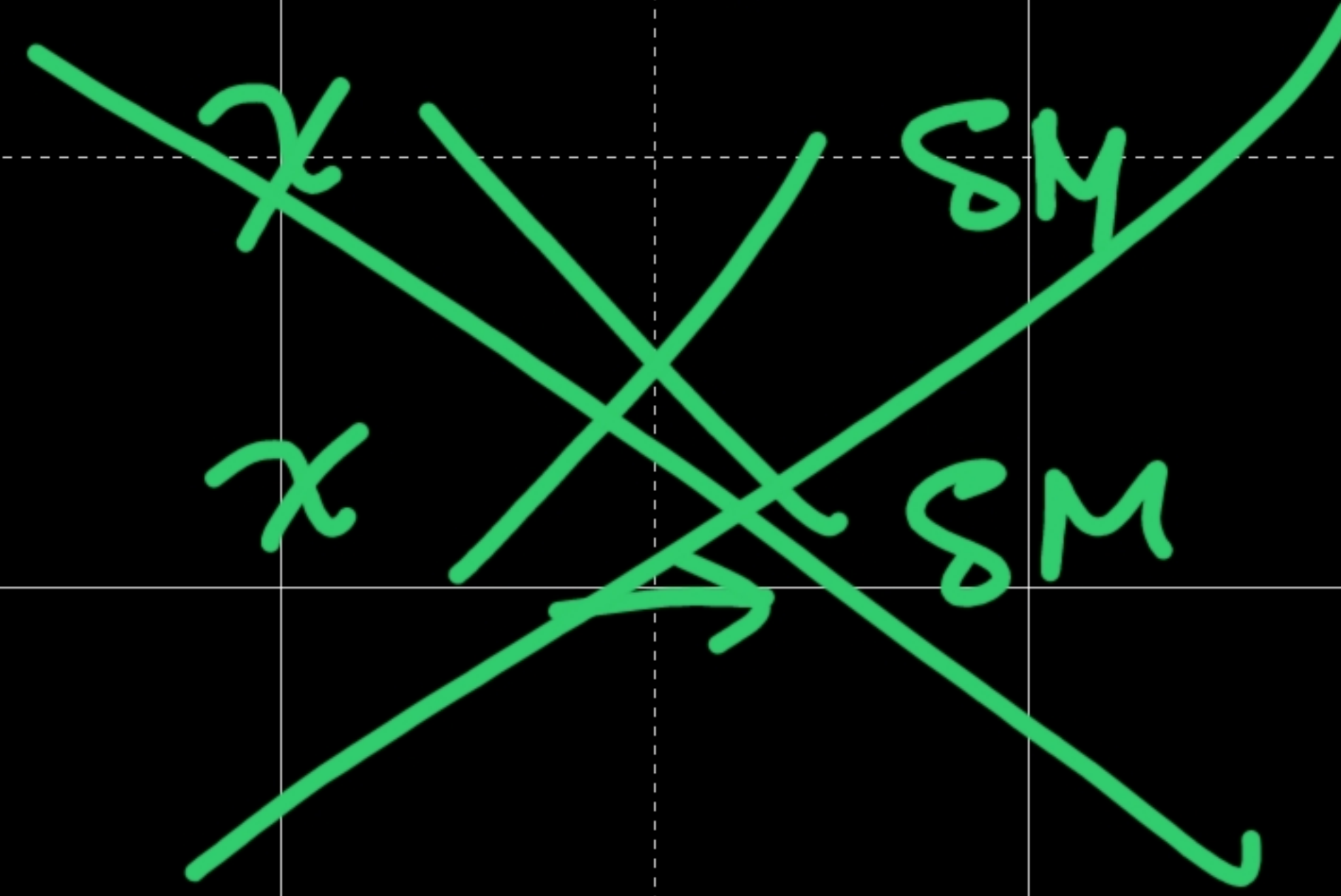
$$f_1 f_2 \frac{(1 \pm \frac{p_1 \cdot p_2}{s})}{(1 \pm \frac{p_3 \cdot p_4}{s})} \quad \text{---}$$

$$\sigma_{12 \rightarrow 34} = \frac{1}{4I} \int d\Phi_3 d\Phi_4 (2\pi)^4 \delta^{(4)}(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) |M_{12 \rightarrow 34}|^2$$

$$\int d\Phi_1 d\Phi_2 \quad 4I g_1 g_2 \sigma_{12 \rightarrow 34} f_1 f_2$$

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{s(s - 4m_\chi^2)}$$

$$\mathcal{V} = \frac{I}{E_1 E_2} = \mathcal{V}_1 + \mathcal{V}_2$$



$$\frac{\chi}{Y_{eq\chi}} \frac{dY_{\chi}}{dx} = - \frac{P_{ann}}{H} \left(\frac{Y_{\chi}^2}{Y_{eq\chi}^2} - 1 \right)$$

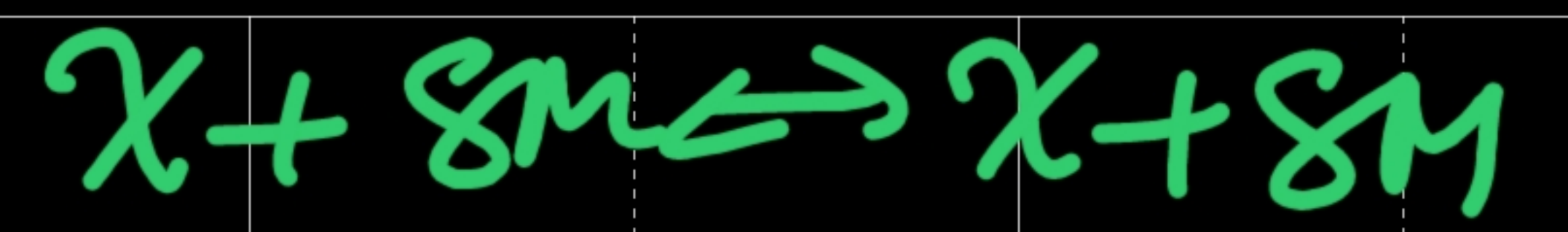
предположим
 $Y_{\chi}(x=x_{min})=0$

Пусть $T \gg m$

$$\frac{dY_{\chi}}{dx} = + \frac{\langle \sigma v \rangle n_{\chi}^{eq}}{xH} Y_{eq\chi}^2 = \frac{\langle \sigma v \rangle S}{xH} (Y_{eq\chi}^2) \sim \frac{T^3 \cdot T}{T^2 T^2}$$

$\langle \sigma v \rangle \approx \frac{1}{2} \frac{v^2}{T^2}$
 $\sigma \sim \frac{1}{s} \frac{1}{s}$

D/3



взять темп $\Gamma_{расс.}$
 и сравнить с H
 в момент x_f

$$\sigma_{расс.} \sim \frac{d^2}{m_{\chi}^2}$$

- а) $m_\chi \ll m_{SM}$ — рождение идет @ $T \sim m_{SM}$, $X = \frac{m_\chi}{m_{SM}}$
 б) $m_\chi \gg m_{SM}$ — рождение идет @ $T \sim m_\chi$, $X = 1$

$$\frac{dY_\chi}{dx} = \frac{\langle \sigma v \rangle n_\chi^{eq}}{xH} Y_\chi^{eq} \quad X = \frac{m_\chi}{T}$$

а) $Y_\chi|_{конеч.} = \frac{\langle \sigma v \rangle n_\chi^{eq}}{H} Y_\chi^{eq}$

$$= \frac{\alpha^2}{T^2} \frac{M_{Pe}}{T^2}$$

$$\left[\frac{5(3)}{4\pi^2} \right]^2 T^3 \frac{45}{2\pi^2} \frac{1}{166.4 g_*}$$

$X = \frac{m_\chi}{m_{SM}} \quad (a)$
 $X = 1 \quad (b)$

$$= 0.004 \frac{\alpha^2}{T} M_{Pe}$$

$T = \begin{cases} m_{SM} (a) \\ m_\chi (b) \end{cases}$

$$\Omega_\chi = m_\chi \frac{n_{\chi,0}}{\rho_c} = m_\chi \frac{\rho_0}{\rho_c} Y_\chi|_{конеч.}$$

$T = \begin{cases} m_{SM} (a) \\ m_\chi (b) \end{cases}$

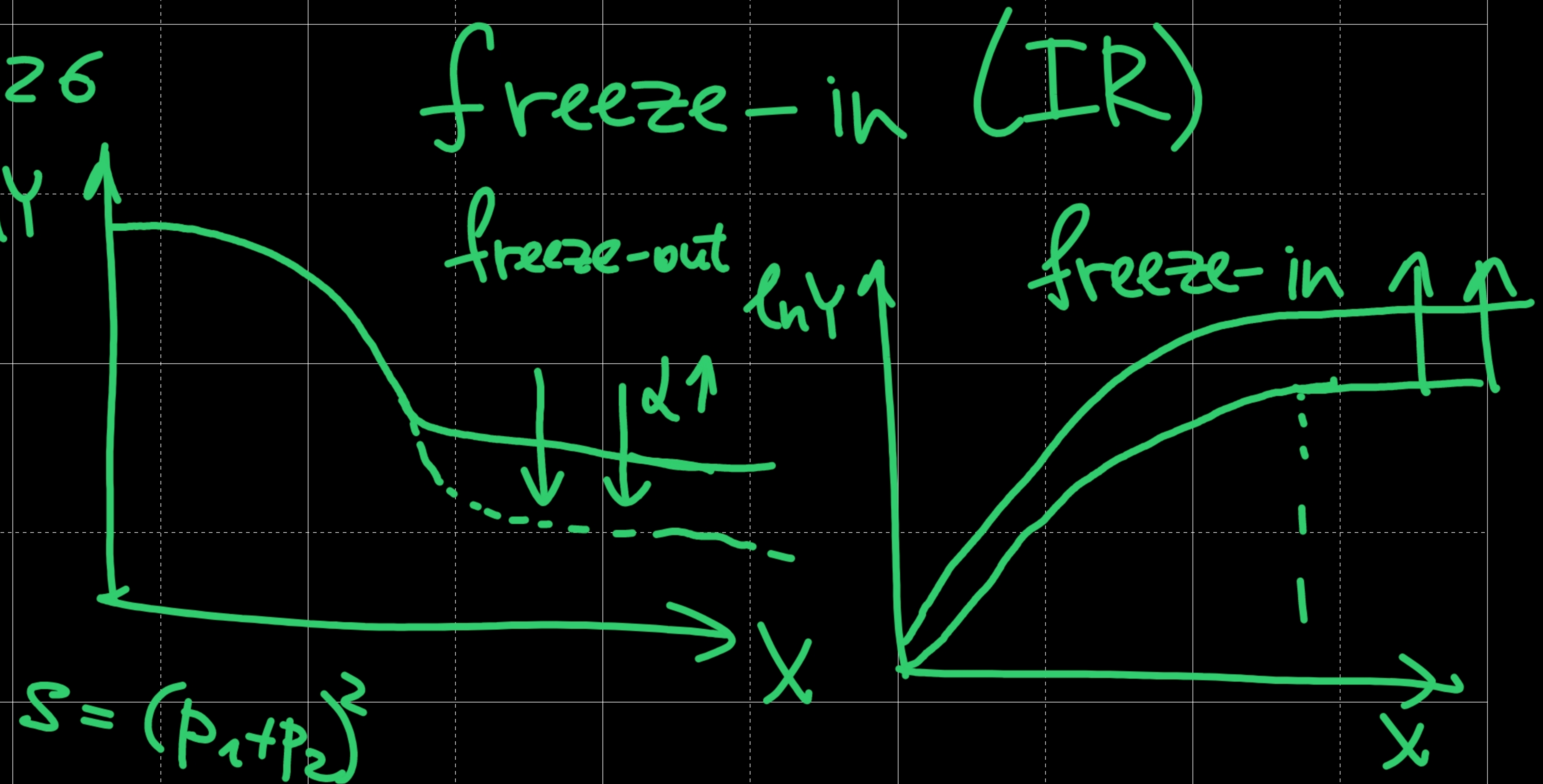
$$\delta) T = m_\chi \quad \Omega_\chi = \cancel{m_\chi} \frac{s_0}{s_c} \frac{\alpha^2 M_{Pl}}{\cancel{m_\chi}} 0.004 = \frac{2.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^3}{0.5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{TeV}}{\text{cm}^3}} \alpha^2 10^{19} \text{ GeV} 4 \cdot 10^{-3}$$

$$\approx 10^{25} \alpha^2 \approx 0.265$$

$$\sigma \sim \frac{\alpha^2}{s} \quad \alpha^2 \sim 10^{-26} \ln Y$$

$$\mathcal{L} = \lambda_{HS} S^2 H^\dagger H$$

$$\sigma \sim \frac{\lambda_{HS}^2}{s}$$



$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \frac{\alpha}{\Lambda^n} \bigcirc_{\text{SM}} \bigcirc_{\text{DM}}$$

$$\sigma\sigma \sim \frac{\alpha^2}{\Lambda^{2n}} E^{2n-2}$$

$$\langle \sigma\sigma \rangle \sim \frac{\alpha^2 T^{2n-2}}{\Lambda^{2n}}$$

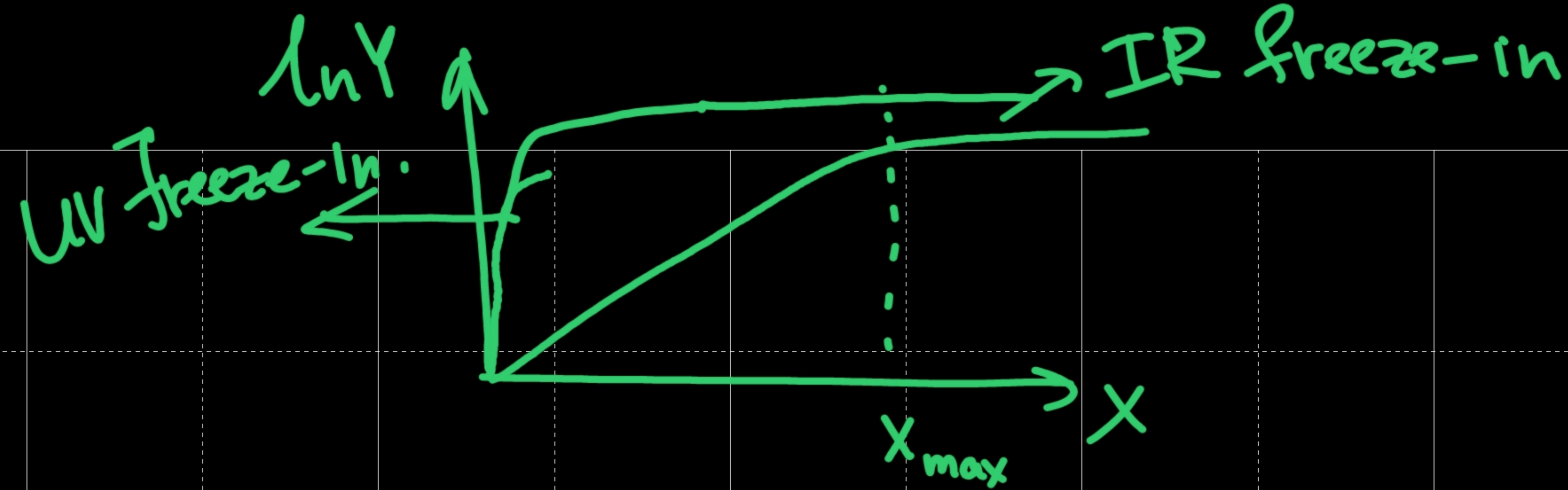
$$\frac{dY_x}{dx} = \frac{\langle \sigma\sigma \rangle}{xH} s(Y_x^{\text{eq}})^2 = \frac{\langle \sigma\sigma \rangle}{xH} n_x^{\text{eq}} Y_x^{\text{eq}} \sim$$

$$\sim T \frac{\alpha^2 T^{2n-2}}{m_x T^2 \Lambda^{2n}} M_{\text{Pe}}^* T^3$$

$$\sim \frac{\alpha^2 T^{2n} M_{\text{Pe}}}{m_x \Lambda^{2n}} = \frac{\alpha^2 m_x^{2n-1} M_{\text{Pe}}}{x^{2n} \Lambda^{2n}}$$

$$Y_{x,0} \sim \frac{\alpha^2 m_x^{2n-1} M_{\text{Pe}}}{x_{\text{min}}^{2n-1} \Lambda^{2n}} \sim \frac{\alpha^2 T_{\text{max}}^{2n-1} M_{\text{Pe}}}{\Lambda^{2n}}$$

UV-freeze-in



SM

$\dots \alpha \dots$

HS

g_{HS}

χ

$\chi\chi \leftrightarrow HS + HS$

1) $\alpha \ll 1$

2) $\alpha \ll 1$

3) $\alpha \ll 1$

$g_{HS} \ll 1$

freeze-in

$g_{HS} \sim 1$

термализация в HS

$g_{HS} \sim 1$

реализация.

, термализация + freeze out в HS

$$1) \mathcal{L}_{int} = \lambda \Phi \chi \psi$$

$$\Phi \rightarrow \chi + \psi$$

Вычислять

$$\Sigma \chi, \psi$$

$$\Phi, \psi - \text{СМ}$$

→ находится в термальной равновесии

считать
то рождение
за счет
freeze-in!

2)

$$\mathcal{L}_{int} = \left(\frac{1}{f_\chi} \right) \chi G_{\mu\nu}^a \tilde{G}_{\mu\nu}^a$$

или глюонов.

$$\tilde{G}_{\mu\nu}^a = \frac{1}{2} \epsilon_{\mu\nu\lambda\rho} G_{\lambda\rho}^a$$

Оценить

или каких параметров

χ — может быть Т.М.

$$\int f(p_1) f(p_2) \rightarrow \int f(p_3) f(p_4) \quad T_{max} \rightarrow 1 \text{ ГэВ}$$

1, 2 → 3, 4

$$g_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \rightarrow \chi + \chi$$

$$\int |M|^2 p_1 p_2 - \int |M|^2 p_3 p_4$$

$$Y_x^{eq} = \frac{n_x^{eq}}{S}$$

$T \rightarrow$

1) $T \gg m_x$

2) $T \ll m_x$

$$n_x^{eq} = g_x \frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3$$

$$n_x^{eq} = g_x \left(\frac{m_x T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{-\frac{m_x}{T}}$$

$$\mathcal{L}_{int} = \lambda \underbrace{\text{S}^2}_{\text{HS}} \underbrace{\text{H}^+ \text{H}}_{\text{SM}} = \hat{\mathcal{O}}_{SM}$$

$$- \langle \sigma \rangle (n_x^2 - n_x^{eq2})$$

$$\text{H}^+ \text{H}$$

1

$$\text{O}_{SM} \text{---} X \text{---} \text{O}_{HS}$$

1) $T \gg m_x$
2) $T \ll m_x$

$$\frac{1}{S}$$

