

量子コヒーレンスを用いたレート増幅と 暗黒物質探索

田中 実 (阪大理)

共同研究者

Wang Jing, 宮本祐樹, 笹尾 登 (岡大基礎研)

日本物理学会 第77回年次大会, 2022/03/16

軽い暗黒物質候補

アクシオン, アクシオン様粒子
略

ダークフォトン

標準模型のゲージセクターの最小拡張 $U_X(1)$

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}X_{\mu\nu}X^{\mu\nu} - \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}X^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_X^2 X_\mu X^\mu - j_{\text{em}}^\mu A_\mu$$

kinetic mixing

2パラメーター: m_X, χ

標準模型+ダークフォトン+インフレーション

Graham, Mardon, Rajendran, PRD93, 103520 (2016)

→ ダークフォトン暗黒物質

$$\Omega_X = \Omega_{\text{CDM}} \left(\frac{m_X}{6 \times 10^{-6} \text{ eV}} \right)^{1/2} \left(\frac{H_I}{10^{14} \text{ GeV}} \right)^2$$

H_I : Hubble scale of inflation

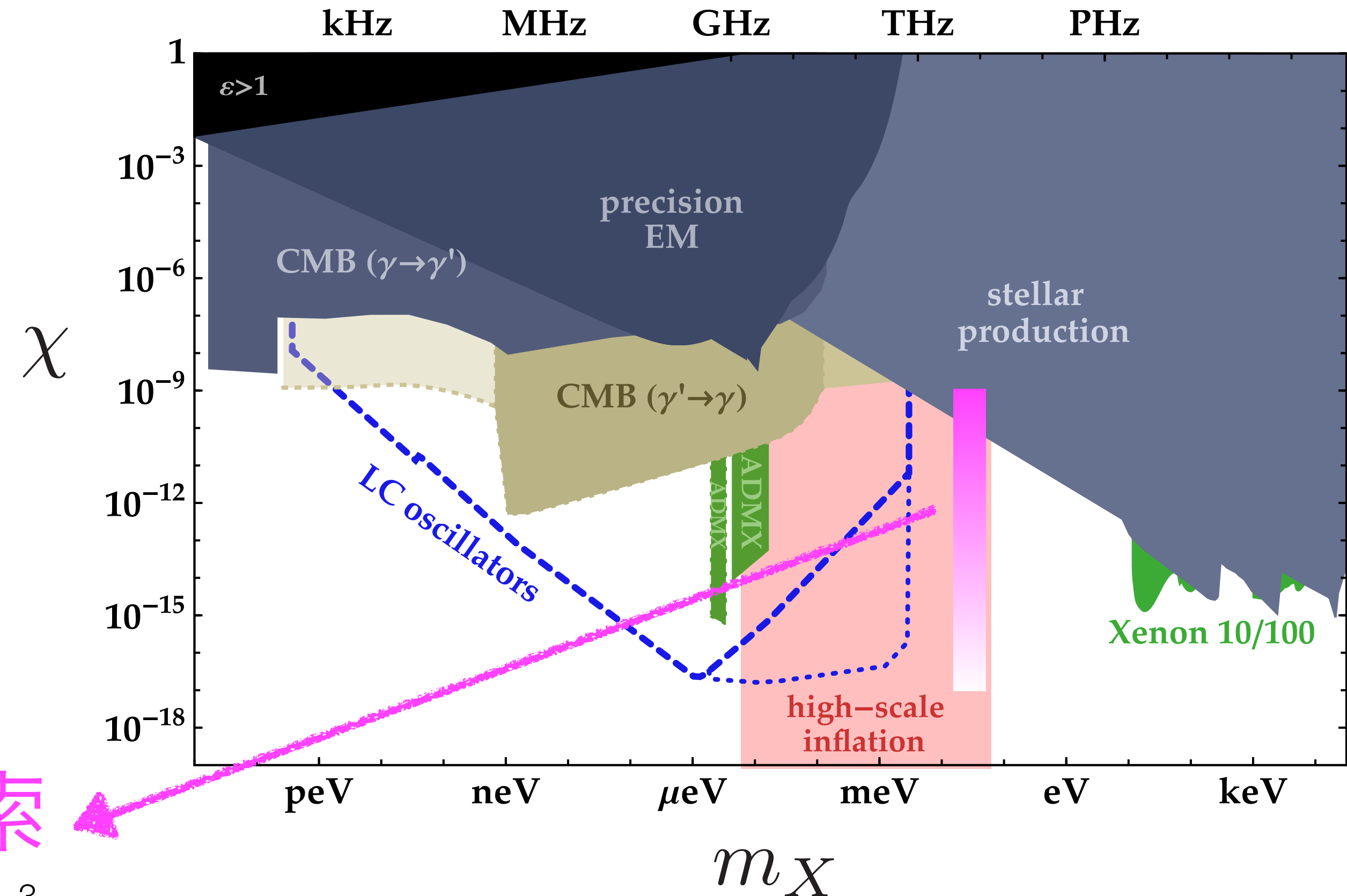
$$H_I \lesssim 10^{14} \text{ GeV}$$

$$\rightarrow m \gtrsim 10^{-5} \text{ eV}$$

coherently oscillating

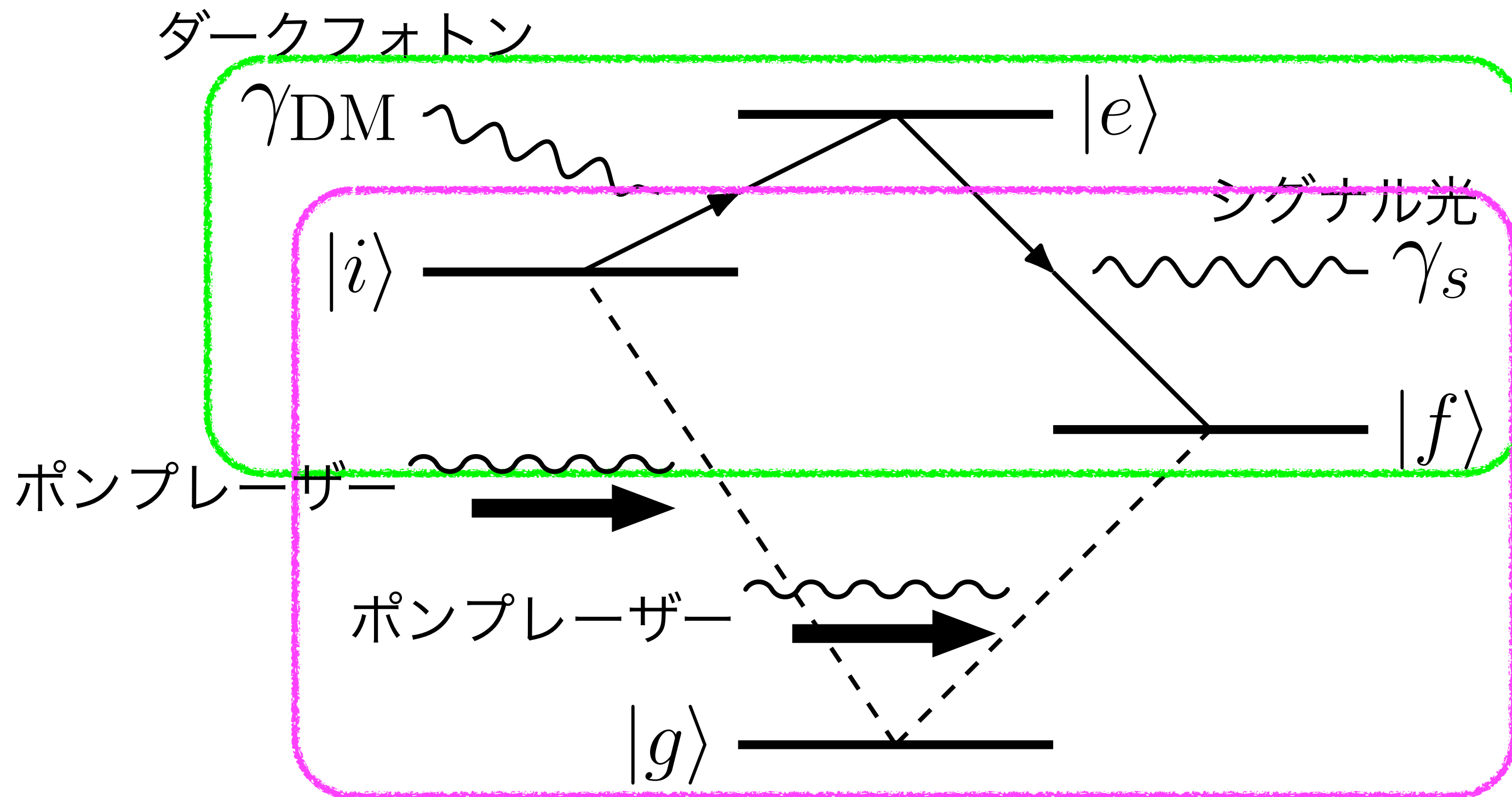
$$X^\mu \propto e^{im_X t}$$

目標: 原子の状態遷移で探索



探索原理

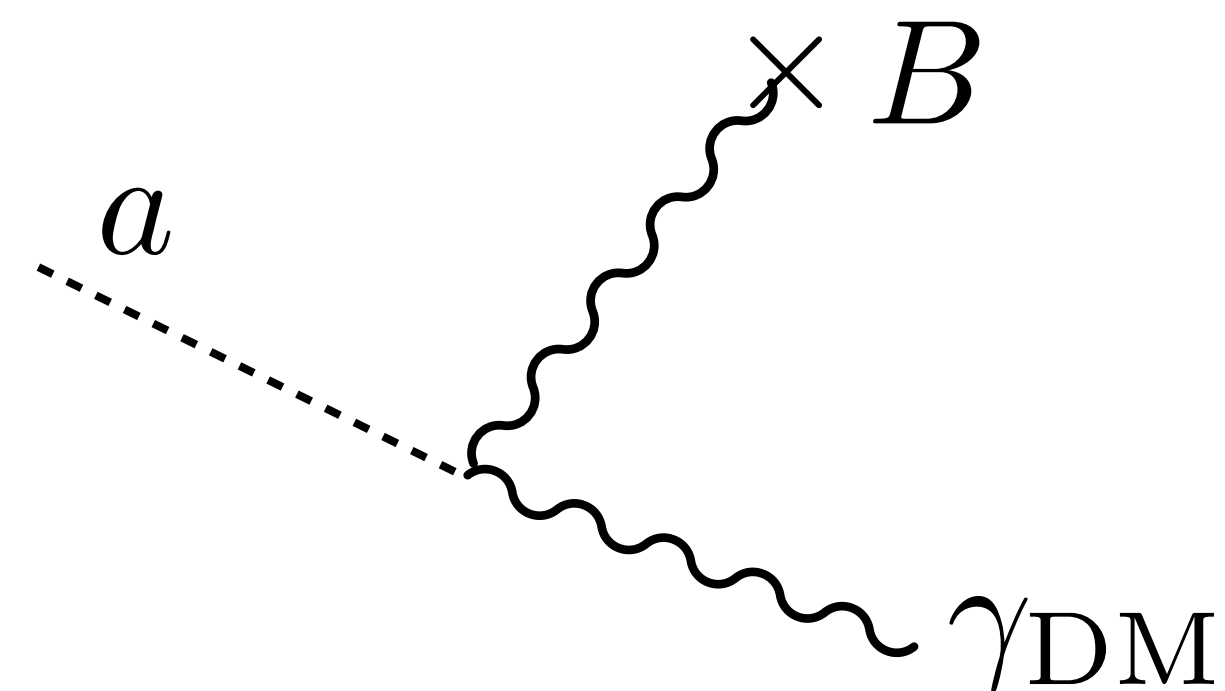
ダークフォトン吸収励起



$$\gamma_{DM} + |i\rangle \rightarrow |e\rangle \rightarrow |f\rangle + \gamma_s$$

コヒーレンス生成

アクシオンの場合



マクロコヒーレンス

ダークフォトン, シグナル光, ポンプレーザーで運動量保存.

Macrocoherence

Yoshimura et al. (2008)

Initial state of N atoms

$$|\Psi\rangle := \prod_a |a, \psi\rangle, \quad |a, \psi\rangle := c_i e^{i\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{x}_a} |a, i\rangle + c_f |a, f\rangle + c_g |a, g\rangle \quad \text{a-th atom}$$

Final state

$$|\Psi\rangle \rightarrow M_{fi} c_i c_f \sum_a |1, \psi\rangle \cdots e^{i(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_s) \cdot \mathbf{x}_a} |a, f\rangle \cdots |N, \psi\rangle \quad M_{fi} : \text{transition matrix element}$$

Coherent rate

$$d\Gamma = 2\pi \delta(m_{\text{DM}} - E_{ei} + E_{ef} - E_s) |M_{fi}|^2 |c_i c_f|^2 \left[N + \sum_{a \neq a'} e^{i(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_s) \cdot (\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_{a'})} \right] \frac{d^3 \mathbf{k}_s}{(2\pi)^3}$$

$V \rightarrow \infty$, N/V fixed V : target volume

$$d\Gamma \rightarrow 2\pi \delta(m_{\text{DM}} - E_{ei} + E_{ef} - E_s) |M_{fi}|^2 |\rho_{fi}|^2 \frac{N^2}{V} (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_s) \frac{d^3 \mathbf{k}_s}{(2\pi)^3}$$

macrocoherent amplification

$$\Gamma = 2\pi \delta(m_{\text{DM}} - E_{ei} + E_{ef} - E_s) |M_{fi}|^2 |\rho_{fi}|^2 n^2 V \quad n := N/V$$

Finite width and volume

Width

$$2\pi\delta(m_{\text{DM}} - E_{ei} + E_{ef} - E_s)$$

$$\Rightarrow L(E_s) := \frac{\Gamma_i + \Gamma_f}{(m_{\text{DM}} + E_i - E_f - E_s)^2 + (\Gamma_i + \Gamma_f)^2/4}$$

Volume

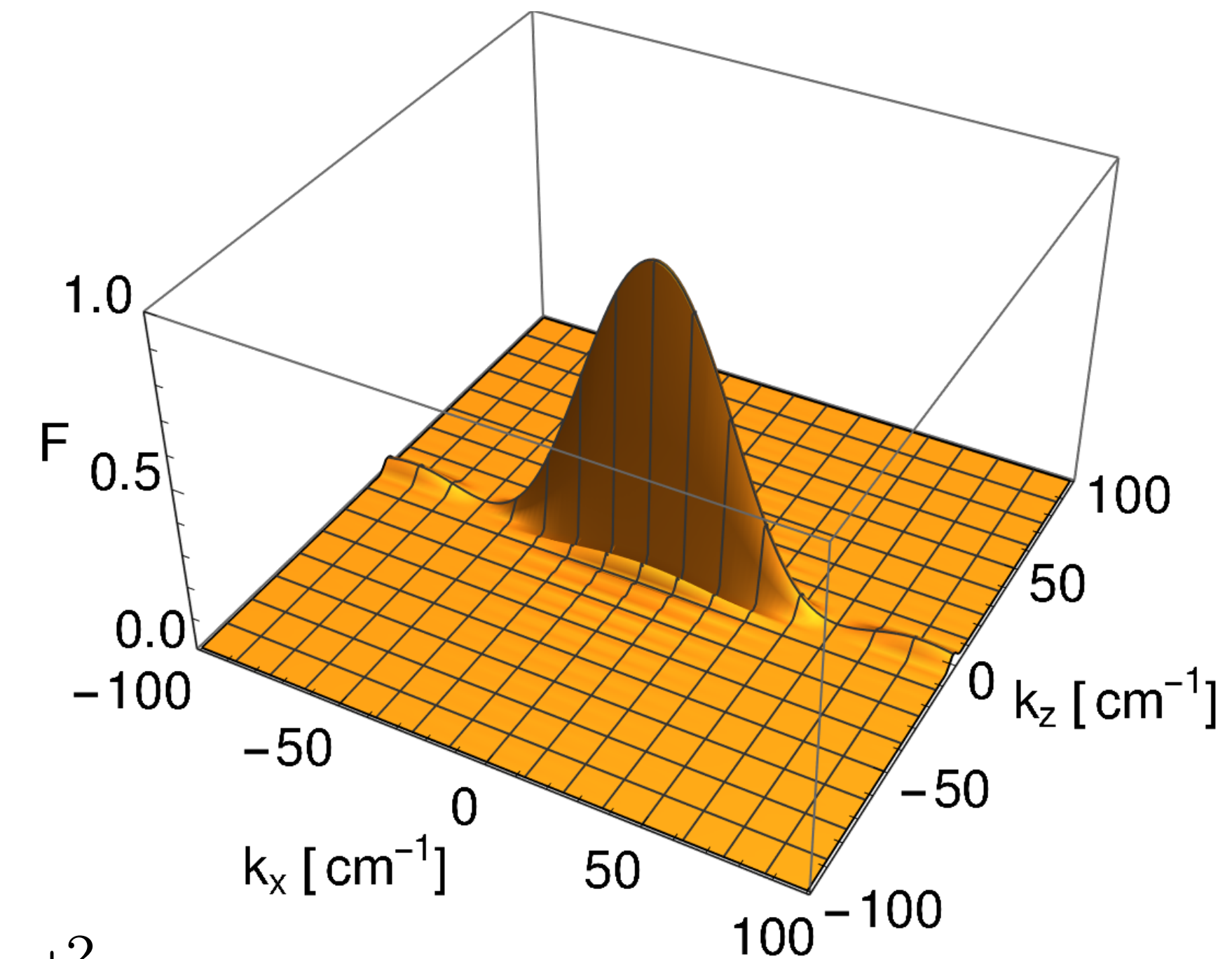
$$\frac{(2\pi)^3}{V}\delta^3(\mathbf{k}) \Rightarrow F(\mathbf{k}) := \frac{1}{N^2} \sum_{a,a'} e^{i\mathbf{k}\cdot(\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_{a'})} = \frac{1}{N^2} \left| \sum_a e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}_a} \right|^2$$

form factor
 $F(0) = 1$

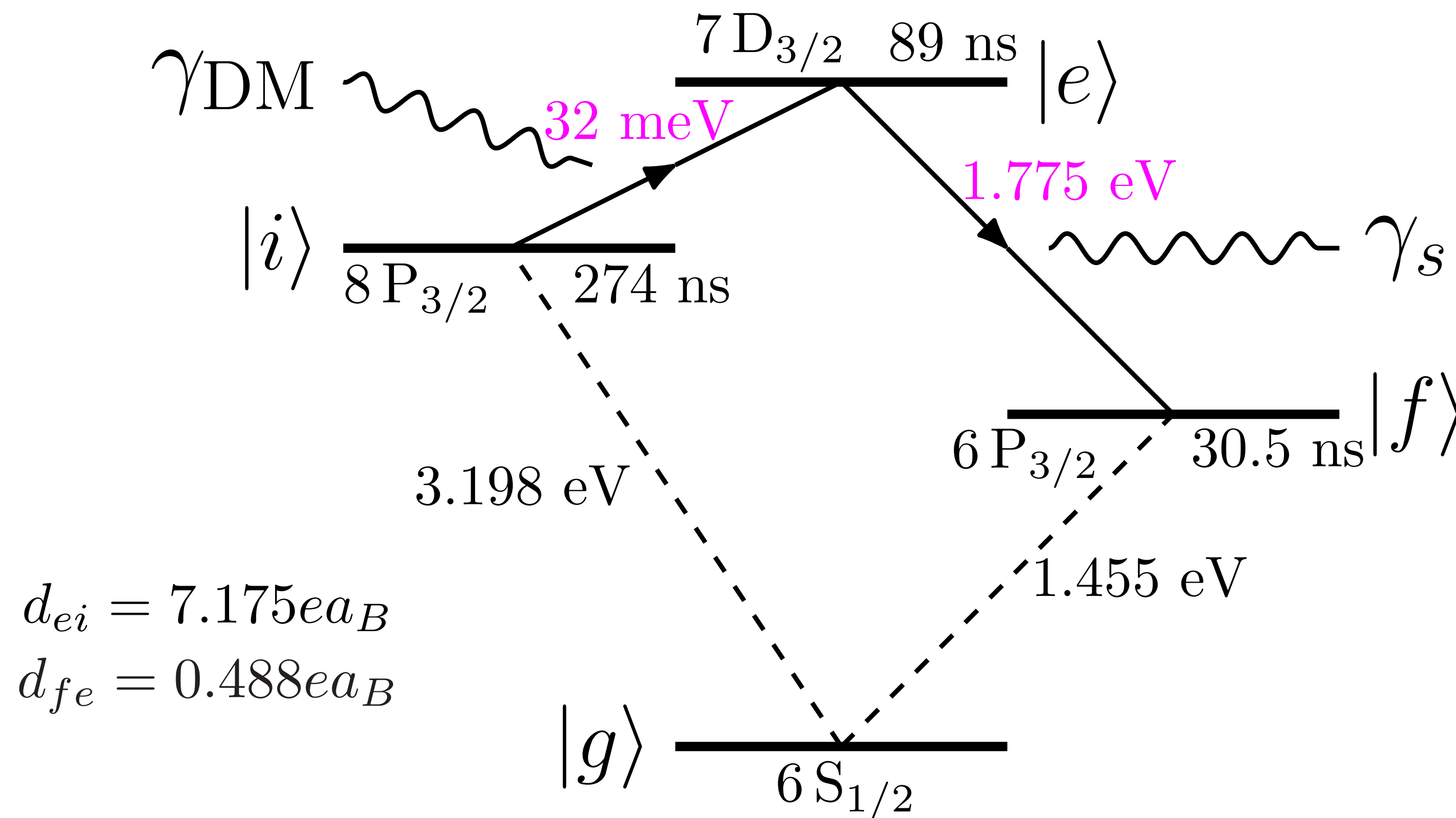
Rate

$$\Gamma \simeq n^2 V |\rho_{fi}|^2 |M_{fi}|^2 \frac{1}{\Gamma_{\text{eff}}} \quad \frac{1}{\Gamma_{\text{eff}}} := \int \frac{V d^3\mathbf{k}_s}{(2\pi)^3} L(E_s) F(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_s)$$

effective (inverse) width



Csパイロット実験計画



target spec.

$$n = 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

$$V = 0.1 \times 0.1 \times 1 \text{ cm}^3$$

$$\Gamma_{\text{eff}} \simeq 2.2 \times 10^{-5} \text{ eV}$$

(\gg natural width)

$$\Gamma = 1.6 \times 10^3 \left(\frac{\chi}{10^{-9}} \right)^2 \left(\frac{n}{10^{12} \text{ cm}^3} \right)^2 \left(\frac{\rho_{fi}}{0.25} \right)^2 \text{ Hz}$$

cf. single atom rate: $\Gamma_0 = 3.7 \times 10^{-9} \left(\frac{\chi}{10^{-9}} \right)^2 \text{ Hz}$

コヒーレンス生成

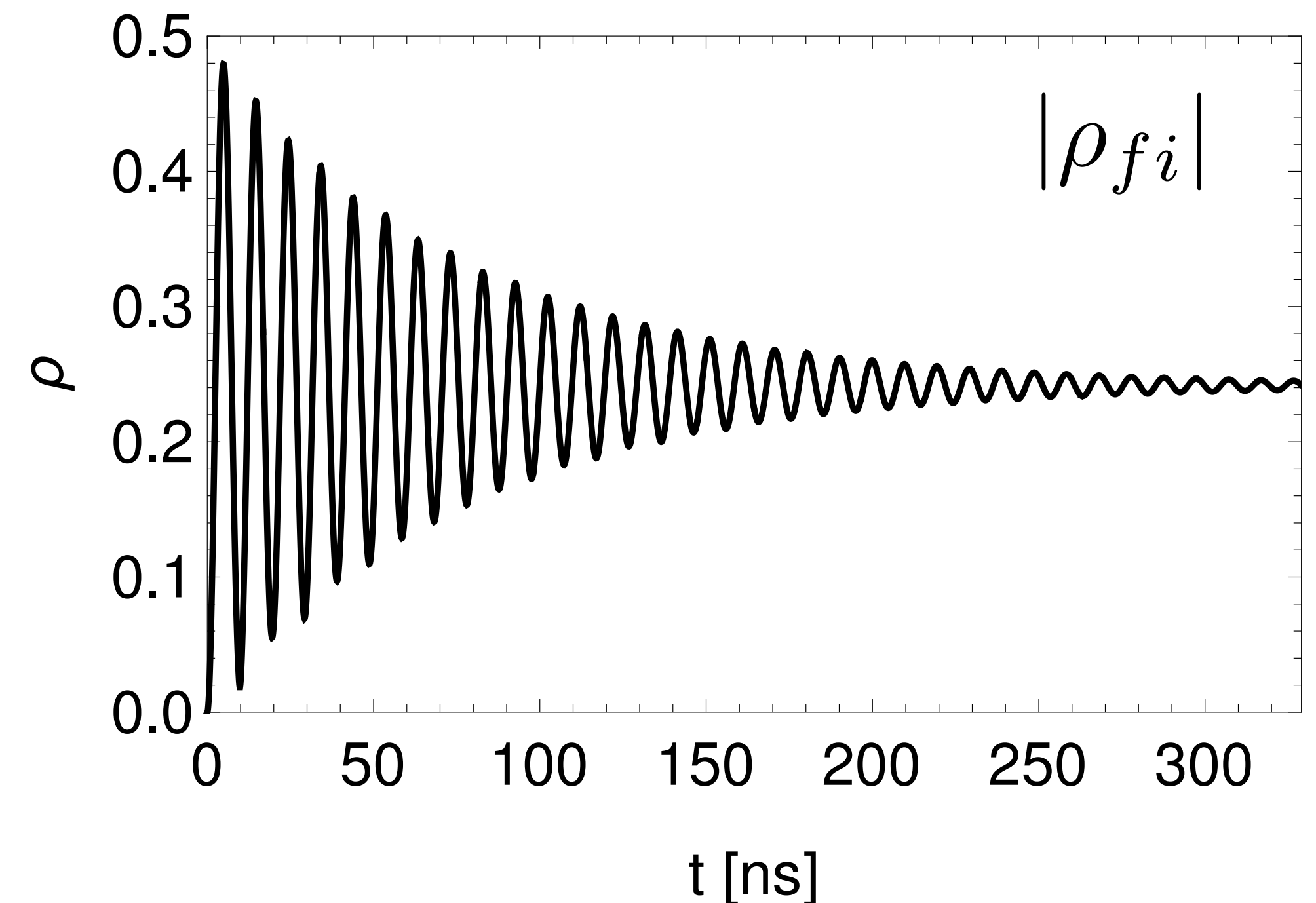
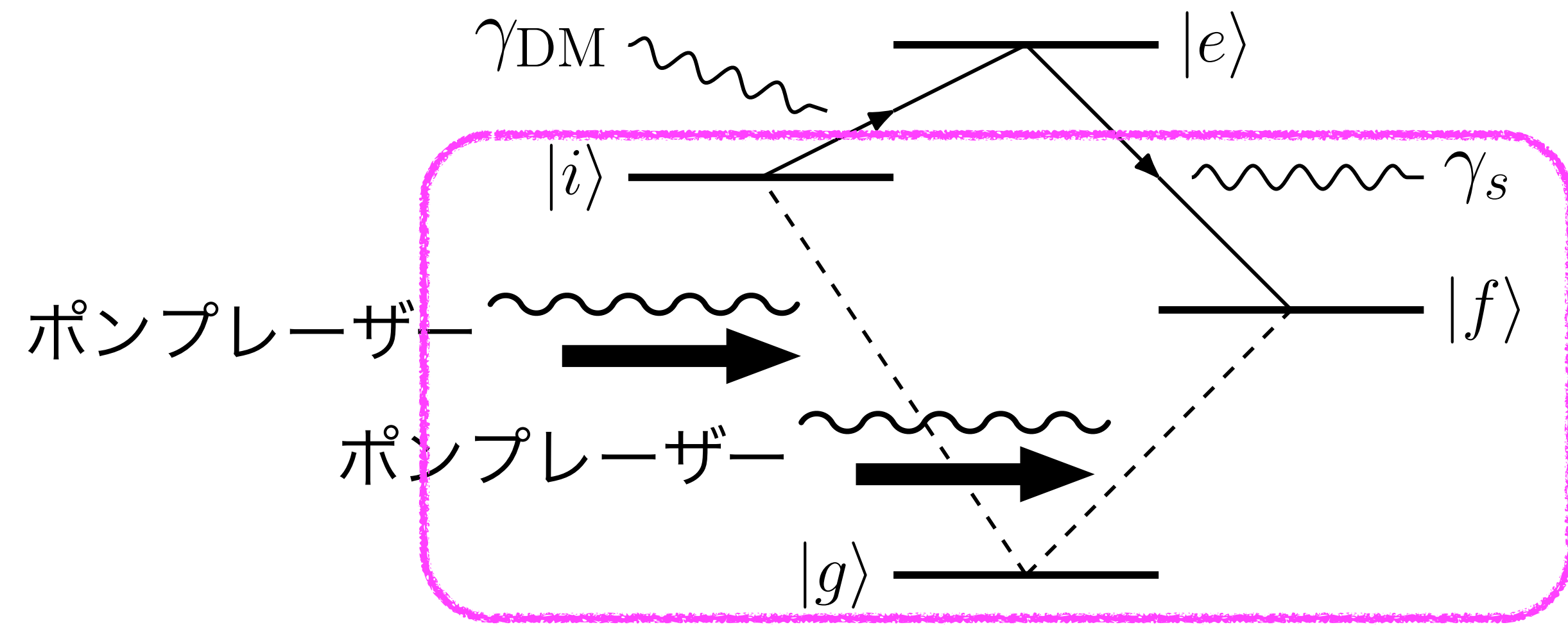
Liouville - von Neumann equation with relaxation

$$\partial_t \rho_{ij}(t) = -i[H(t), \rho(t)]_{ij} - \sum_{m,n} \Gamma_{ij,mn} \rho_{mn}$$

Cs parameters with radiation damping only

CW laser power: 1W(g-i), 1mW(g-f)

Laser cross section: 1mm²



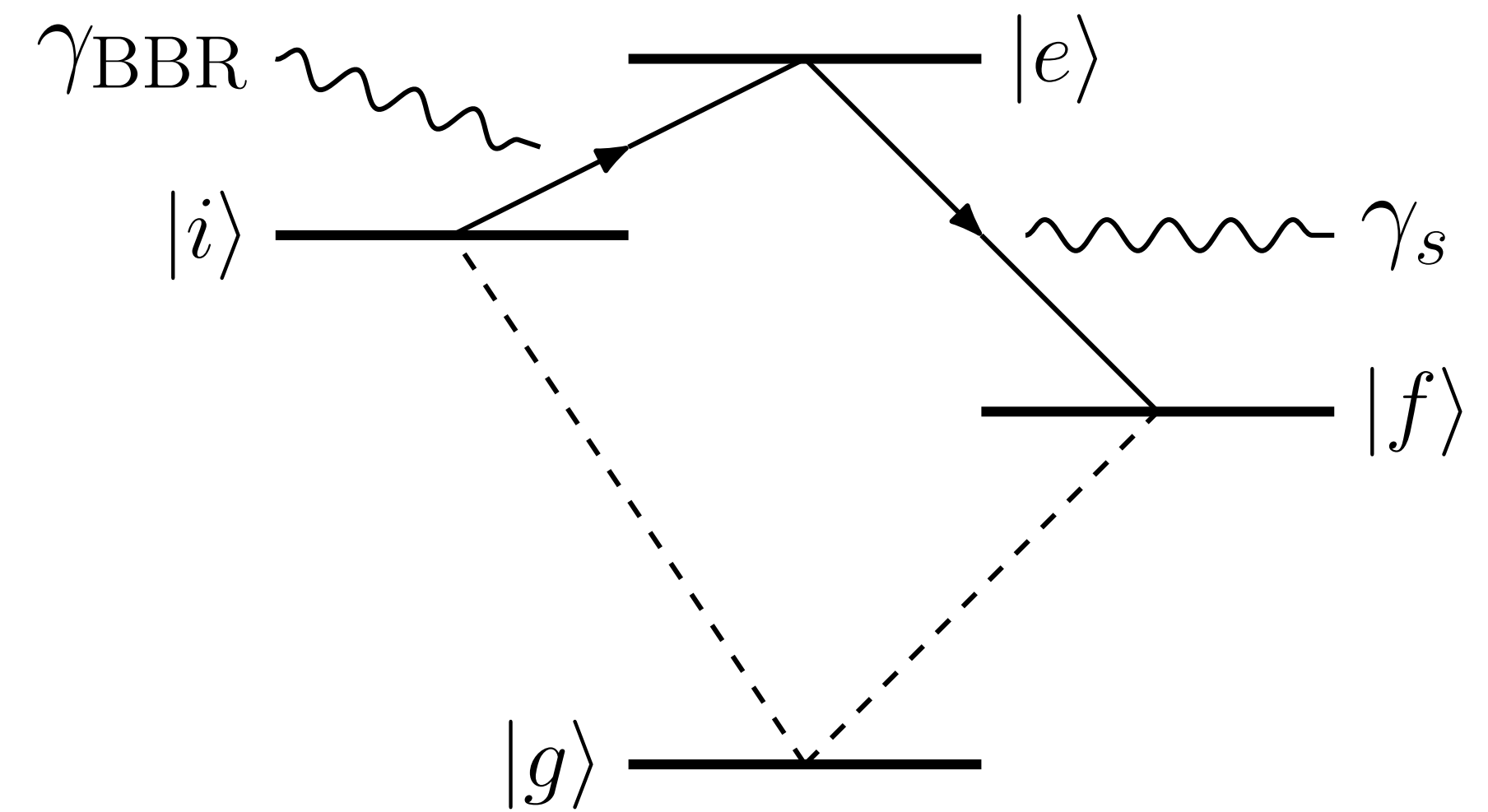
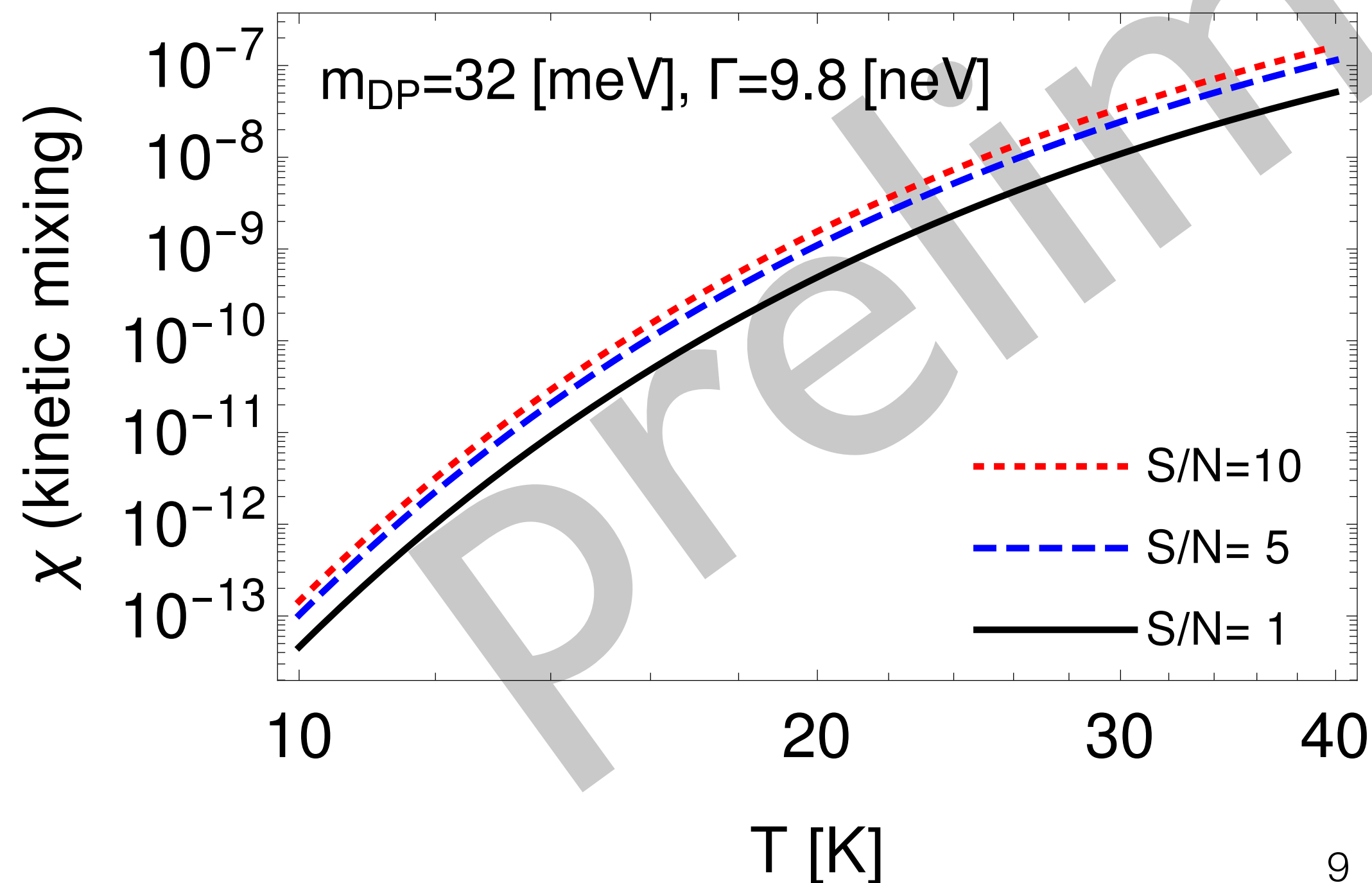
バックグラウンド例

Black-body radiation

dark photon \rightarrow BBR photon

not macrocoherent in the limit of $N, V \rightarrow \infty$ (N/V fixed)

potentially dangerous for finite volume



まとめ

- 原子集団のコヒーレンスを用いたレート増幅

ρ_{fi} が重要. マクロコヒーレンスと運動量保存.

- ハローダークフォトン/アクシオン探索計画

Csパイロット実験計画が進行中 (岡山大)

冷却ビーム, 緩和過程, バックグラウンド等, 検討中

- 理論的課題

ダークフォトン偏極の検出方法

シグナル時間変動

高密度(固体)標的