極めて軽いダークマターの新しい検出方法

In preparation

Hajime Fukuda, T.T. Yanagida, S. Matsumoto

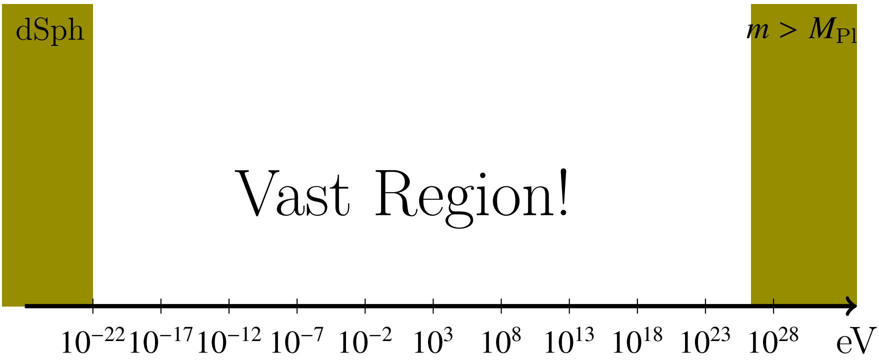
Kavli IPMU, U. Tokyo

August 1, 2017

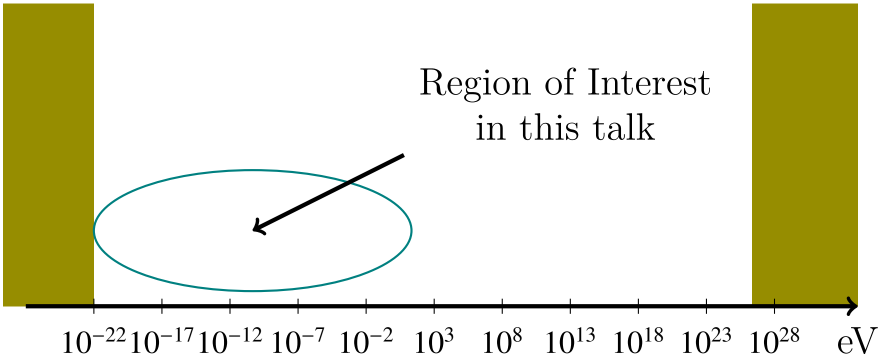
Introduction

- DM は最も確立した BSM の一つ
- 質量は？

Particle DM Mass Range



Particle DM Mass Range



Ultralight DM

- DM for $10^{-22}\,\mathrm{eV} \lesssim m_{\mathrm{DM}} \lesssim \mathrm{eV}$
- Must be Bosonic
- CDM になれる
  - Coherent oscillation/decay of defects/...
- Several interesting astrophysical signature
  - e.g. Hu, et al., 2000
- Moduli? ALP?

今日の本題

- 軽い DM を検出する方法を考えたい
  - Indirect detection
  - Production
  - Direct detection

Direct Detection

- One recoil, $q \sim p = mv$, is small
- However, $n_{\mathrm{DM}} \sim \rho/m$ is quite large
- The total momentum transfer: $Q \propto qn \sim v\rho$
    - 実は小さくなくてもよい
- 断面積に量子力学的な enhancement 効果

問題

- 何をターゲットにすればいいか？
  - Measurement must be precise enough
  - Large enhancement
- 正しい enhancement の見積もり

Enhancement Effect

- 2 種の Enhancement 効果
  - Stimulated emission (誘導放射)
  - Coherent effect on the target

Stimulated Emission

- 例: レーザー

$$\mathcal{A} = \langle \gamma | a^\dagger | 0 \rangle$$

$$\to \mathcal{A}' = \langle (N+1)\gamma | a^\dagger | N\gamma \rangle = \sqrt{N+1}\mathcal{A}$$

- なぜなら

$$|N\gamma\rangle = \frac{1}{\sqrt{N!}} \left(a^\dagger\right)^N |0\rangle$$

より、$a^\dagger |N\gamma\rangle = \sqrt{N+1}|(N+1)\gamma\rangle$ だから

Stimulated Emission

- 相空間の粒子密度を $\mathcal{O}$ とすると、$\sigma \propto \mathcal{O} + 1$
  - ただし、

$$\int \frac{\mathrm{d}^3 k}{(2\pi)^3} \mathcal{O}(k) = n$$

Enhancementの大きさ

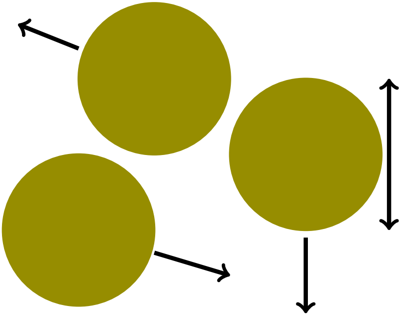
- 銀河内でDMは$v \sim 10^{-3}$のガウス分布
- DMが均一だと思えば

$$\mathcal{O} \sim \frac{\rho}{m}\frac{1}{(mv)^3} \sim 10^3 \left(\frac{\mathrm{eV}}{m}\right)^4$$

- 軽ければ軽いほど大きくなる
  - 軽いDMによい

使えるか？

- DM の final state 分布を知らないと使えない
- coherent oscillation していると、ダメ？



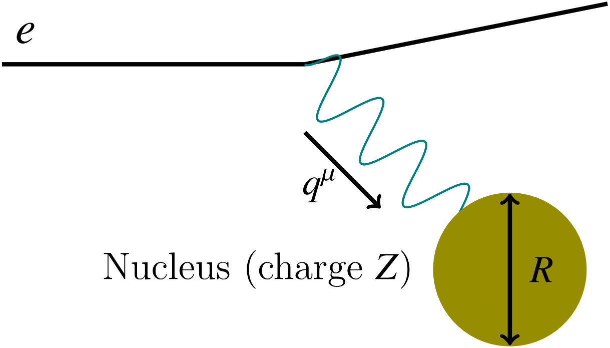
$$R_J \gtrsim r \gtrsim \frac{1}{mv}$$

Enhancement Effect

- 2種の Enhancement 効果
  - Stimulated emission - × (or △)
  - Coherent effect on the target

Coherent Effect

- e.g. Coulomb scattering



- For $qR < 1$, $\sigma \propto Z^2$!

Coherent Effect

- 「低 q で細かい構造は絶対見えない」
- いわゆる DM の Spin-independent 散乱と一緒
  - $\sigma \sim [Z\sigma_p + (A-Z)\sigma_n]^2|F(q)|^2$
  - 軽い DM も、spin-independent でないとダメ
- それだけ？ 他に条件は？ Form factor?

もっとくわしく

- 第一量子化のレベルで考えるとわかりやすい
- Born 近似: $\mathcal{A} \sim m\langle k'|V|k\rangle$
- Target がたくさんあると、

$$V(x) = \sum_i V_i(x - x_i), \mathcal{A}_{\text{tot}} = \sum_i e^{iqx_i}\mathcal{A}_i$$

- $qx_i \to 0$ for all i, $\mathcal{A}_{\text{tot}} \simeq N\mathcal{A}$
- 振幅が N 倍、断面積は N^2 倍！
- 軽いほど q が小さくてよい

何をターゲットに使うか

- 誘導放射と異なり、ターゲット選びが大事
- 大きいほど良い
- 太陽系の天体！, $N \sim 10^{50\text{–}58}$
  - Measurement is very accurate, $\Delta\nu/\nu\Delta t \lesssim 10^{-(17\text{–}19)}\,\mathrm{s}^{-1}$
- 断面積は 10^{100} 倍！？

もっとくわしく

- 第一量子化のレベルで考えるとわかりやすい
- Born 近似: $\mathcal{A} \sim m\langle k'|V|k\rangle$
- Target がたくさんあると、

$$V(x) = \sum_i V_i(x - x_i), \mathcal{A}_{\text{tot}} = \sum_i e^{iqx_i}\mathcal{A}_i$$

- $qx_i \to 0$ for all i, $\mathcal{A}_{\text{tot}} \simeq N\mathcal{A}$
- 振幅が N 倍、断面積は N^2 倍！
- 軽いほど q が小さくてよい

もっとくわしく

- 第一量子化のレベルで考えるとわかりやすい
- Born 近似: $\mathcal{A} \sim m\langle k'|V|k\rangle$
- Target がたくさんあると、

$$V(x) = \sum_i V_i(x - x_i), \mathcal{A}_{\mathrm{tot}} = \sum_i e^{iqx_i}\mathcal{A}_i$$

- $qx_i \to 0$ for all i, $\mathcal{A}_{\mathrm{tot}} \simeq N\mathcal{A}$
- 振幅が N 倍、断面積は N^2 倍！
- 軽いほど q が小さくてよい

本当の断面積

- $N^2|F(q)|^2$ enhance は、Born 近似を仮定
- Born 近似:『散乱体中で 1 回しか散乱しない』
  - 相互作用が強いとダメ
  - 散乱体が大きいとダメ
- Schrödinger eq. を真面目に解く

Schrödinger eq. の解き方

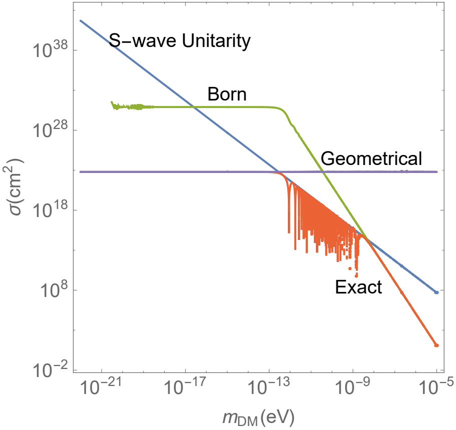
- 簡単のため、一様密度球と近似
- まず、Potential を求める
    - 定ポテンシャル球 $V(r) = V_0 H(R - r)$ なはず
    - V_0 は、密度の関数なはず
    - 小さな球で、マッチ
        - $V(r)$ に Born 近似を適用できる
        - N^2 enhancement

$$\sigma = N^2\sigma_0, \quad \sigma_0 = \frac{\Lambda_{\mathrm{QCD}}^2}{4\pi\Lambda^4}$$

と比べる

- 球対称ポテンシャルなので、部分波展開

例:太陽-DM 断面積



- 断面積は、最大で星の幾何断面積 πR^2 程度

量子力学的な enhancement のまとめ

- 誘導放射は、よくわからない
- コヒーレント効果は使えそう
- ターゲットは大きいほどよい
    - 太陽系の天体をターゲットに
    - 断面積は幾何断面積が上限

制限

- 天体の運動から散乱断面積に制限をかける
- 太陽系は、銀河系に対し動いている
- DM-星散乱は、『DM の風』、摩擦として働く
- 速度が変われば、周期・距離が変化

実際の制限

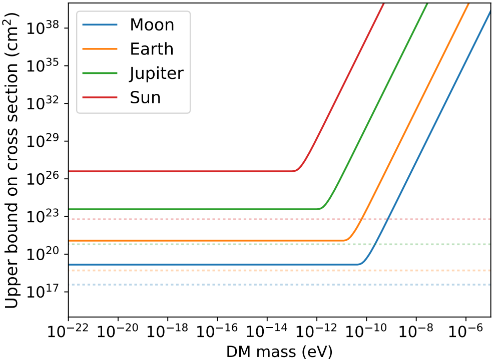
- Ephemeris(天体暦) を使って制限をかける
  - 天体暦とは、様々な観測データから天体の運動をパラメタフィットしたもの
- 最新の天体暦は、数値的天体暦
  - ちょっと大変
  - Naive に、$\Delta \ln v/\Delta t \sim \Delta L/T^2$ などとする

Cross section と星のサイズ

- 重い星ほど、弱い相互作用でも、幾何断面積に達する
  - 軽い星では enhancement が弱すぎて、幾何断面積までいかない
  - $\sigma_0 \sim {m_{\rm DM}}^2/\Lambda^4$ とすると、月、地球、木星、太陽の順に $\Lambda \lesssim 10^{13,14,15,16}$ GeV
- 軽い星ほど影響を受けやすい
  - 速度の変化を見る
  - 運動方程式: $F = ma$
- それぞれの星ごとに範囲が異なる

Final Result

- For the best target, we need one order more



Summary

- とても軽い粒子の相互作用には、量子力学的な enhancement がある
- Coherence を利用できると、天体との相互作用で $m \ll \mathrm{eV}$ な DM も検出できるかも