超重粒子の崩壊による
超高エネルギー宇宙線の生成機構

植原 洋介
(東大理)

§ Introduction

§ Superheavy Darkmatter

◎ 熱浴にあったDMに対するmass limit

◎ gravitational production of DM

◎ metastabilityの実現方法

- quantum gravity
- instanton effect
- discrete gauge symmetry
- extra dimension

§ Topological Defect

- cosmic string
- monopolonium
- cosmic necklace

§ Summary

§ Introduction

GZK cutoff ($E \sim 5 \times 10^{19}$ eV)

：宇宙線核子がCMB photonと photopion production ($N\gamma \to N\pi$) を起こしだすエネルギー

実験によると, GZK cutoffは存在しない？

- 強力な加速機構による説明 (bottom-up)
- 超重物質の崩壊による説明 (top-down)

bottom-up シナリオの困難

- 加速エネルギーの限界 ($\lesssim 10^{20}$ eV)
- 加速天体の位置の問題

"top-down" シナリオによる解釈

- metastableな超重粒子崩壊
- topological defectの崩壊

：いかにして長寿命を実現するか？

§ Superheavy Darkmatter

超高エネルギー宇宙線を説明するために
superheavy darkmatter "X" がみたすべき条件

◎ GZK cutoffを超えるエネルギーを持つこと

$$m_X \geq 10^{12}\,\mathrm{GeV}$$

◎ 宇宙線 fluxが観測とconsistentたること

◎ Xが宇宙をoverclose しないこと

$$\Omega_X < \Omega_{CDM}$$

◎ Xの寿命が宇宙年齢より長いこと

$$\tau_X > 10^{10}\,\mathrm{yr}$$

$$\to 10^{10}\,\mathrm{yr} < \tau_X < 10^{22}\,\mathrm{yr}$$

$$10^{-12} < \Omega_X < 1.$$

☆ darkmatter に対する mass limit

DM X が過去に一度でも熱浴にあったとする

：高温では $n_X \sim n_\gamma$。

$T < m_X$ で n_X は exponential に減少。

十分 T が下がると "freeze out"

$$\Omega_X h^2 \simeq \frac{3\times10^{-27}\,\mathrm{cm^3/s}}{\langle \sigma(X\bar{X}\to \mathrm{all})\, v_{rel}\rangle}$$

X の散乱過程に "unitarity bound"

$|S_{elastic}|^2 + |S_{inelastic}|^2 = 1$ を用いて

$$(\sigma_J)\, v_{rel} \lesssim \frac{4\pi(2J+1)}{m_X^2 v_{rel}} \simeq \frac{3\times10^{-22}(2J+1)\,\mathrm{cm^3/s}}{[m_X/1\,\mathrm{TeV}]^2}$$

$$\therefore\ 1.7\times10^{-6}\sqrt{x_f}\left[\frac{m_X}{1\,\mathrm{TeV}}\right]^2 \leq \Omega h^2 < 1$$

$$m_X \leq 340\ \mathrm{TeV}$$

Superheavy DM は熱的に作れない

☆ gravitational production

inflationの最後、(matter / radiation) dominationに相転移する際χを重力で生成できる.

conformal metric $ds^2 = a^2(\eta)(d\eta^2 - dx^2)$

$$S = \int d\eta d^3x \frac{a^3}{2}\left(\dot{\chi}^2 - \frac{(\nabla\chi)^2}{a^2} - M_\chi^2\chi^2 - \xi R\chi^2\right)$$

$$\chi(x) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^{3/2}a(\eta)}\left[a_k h_k(\eta) e^{i\mathbf{k}\cdot x} + a_k^\dagger h_k^*(\eta) e^{-i\mathbf{k}\cdot x}\right]$$

$$[a_k, a_{k'}^\dagger] = \delta^3(\mathbf{k}-\mathbf{k}') \rightarrow h_k h_k'^* - h_k' h_k^* = i$$

$$\rightarrow h_k''(\eta) + \omega_k^2(\eta) h_k(\eta) = 0 \quad \text{mode equation}$$

$$\omega_k^2 = k^2 + M_\chi^2 a^2 + (6\xi - 1)\frac{a''}{a}$$

最大の問題はχの長寿命の説明.

☆ metastability : instanton effect

Yang-Mills action of instanton

$$S = \int d^4x \frac{1}{4g^2} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} = \frac{8\pi^2}{g^2} \nu$$
$$= \frac{2\pi}{\alpha} \quad (\nu = 1)$$

instanton-induced な process は $\mathcal{L} \propto e^{-S}$

e^{-2S} で suppress

X は摂動的に安定だが instanton で decay するなら

$$\tau_X \sim \frac{1}{m_X} \exp\left(\frac{4\pi}{\alpha}\right) \qquad 10^{10}\,\mathrm{yr} < \tau_X < 10^{22}\,\mathrm{yr}$$

$$\therefore \ \alpha = \frac{1}{10} \sim \frac{1}{12}$$

SM のゲージ群につけ加えて. non-Abelian な
ゲージ群が高エネルギーで存在すればよい

toy model : $SU(2)_X$ ゲージ対称性が破れていて
X. Y 粒子が mass を得る.

$$X \xrightarrow[\text{instanton effect}]{} Y + \text{quarks} + \text{leptons}$$

★ metastability : quantum gravity

Xは conserved charge ("R′-charge") を持ち安定だが wormhole が R′-charge をうばって decay する.

X : SU(2)×U(1) の表現の fermion とすると

$$\mathcal{L}_{decay} \sim \frac{1}{M_{pl}} \bar{X} \nu \phi \phi e^{-S}$$

$$\tau_X \sim \frac{192(2\pi)^3}{(G_F v^2)^2} \frac{M_{pl}^2}{m_X^3} e^{2S} > 10^{10}\,\mathrm{yr}$$

$m_X \gtrsim 10^{13}\,\mathrm{GeV}$: $S > 44$ で OK

wormhole action

$$S \simeq \int d^4x\, \mathcal{L}_{stringy} \simeq \frac{8\pi^2}{g_{str}^2}$$

$$\frac{g_{str}^2}{4\pi} \simeq \frac{g_{GUT}^2}{4\pi} \simeq \frac{1}{24} \qquad S > 44.$$

☆ metastability : discrete gauge symmetry

X および MSSM 粒子に Z_N-charge を assign
低次の項を禁止して長寿命を実現.

条件: ① MSSM の superpotential は全て Z_N-invariant.

② Z_N の全てのアノマリーは消える.

通常の anomaly-cancellation の議論では 10^{-7} sec 程度の寿命しか得られない.

∵ Green-Schwarz term による anomaly cancellation で

$$W = \left(\frac{1}{M_{pl}}\right)^7 \bar{d}\bar{d}\bar{d}\,l\,l\,l\,H_u l H_d X \quad (Z_{10}\ \text{sym})$$

$$\tau_X \sim \left(\frac{M_{pl}}{M_X}\right)^{14}\frac{1}{M_X} \simeq 10^{11}\,\text{yr} - 10^{26}\,\text{yr}$$

が許される.

☆ metastability : extra dimension (1)

・(4+n)次元時空

我々の brane visible brane ($y=0$)の他に hidden brane ($y=y_*$)がある

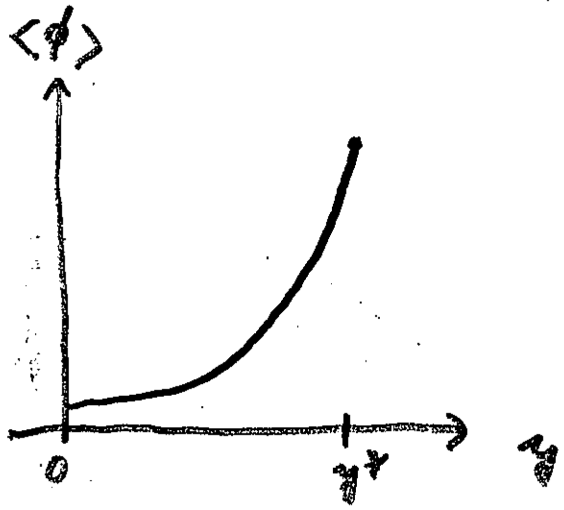
・全てのMSSM粒子と X は visible braneにあり 他に gauge-singlet ϕ が bulk にある.

・X とMSSM粒子の direct couplingを防ぐため Z_2-symmetryを課し X と ϕ に charge 1 を assign

→ X の decay に relevant な superpotential

$$W=\frac{1}{M_*}\phi X H_1 H_2$$

ϕ が hidden brane で VEV $\langle\phi\rangle(y_*)\sim M_*$ を持つなら visible brane では



$$\langle\phi\rangle(0)=M_* e^{-m_\phi r} \quad (n=1)$$

$$\langle\phi\rangle(0)\simeq M_* \frac{e^{-m_\phi r}}{\sqrt{m_\phi r}} \quad (n=2)$$

$$\langle\phi\rangle(0)\simeq M_* \frac{e^{-m_\phi r}}{(m_\phi r)^{n-2}} \quad (n\geq 3)$$

☆ metastability : extra dimension (2)

我々の brane での effective coupling は exponential に suppress されて

$$W = g_{eff} X H_1 H_2$$

$$g_{eff} = e^{-m_\phi r} \quad (n=1)$$

$m_\phi r \sim 70$ で自然に長寿命が実現.

しかも X は必ず H_1 H_2 に decay

→ 宇宙線のスペクトルが定まる : testable

特に, higgs & higgsino に decay : 超高エネルギー neutrino, neutralino が含まれる

現在の実験では cross section が小さいので十分な数とらえられない.

将来の宇宙利用実験 (EUSO) でとらえられる

§ Topological Defect

inflationで topological defectは全てうすめられる?

→ inflation後の preheatingの時期の non-thermal phase transitionで作れる。

: metricの急激な変化で inflatonとcoupleした粒子を作り, その粒子の振動で inflatonの symmetryを回復させる

◎ 問題点

superheavy DMは 我々の銀河ハローに集中しているが, TDは銀河外にもある

: decay productの起こす EM cascadeが実験での 銀河外光子 fluxを超えるかもしれない

SUSY-QCDによる計算は EGRETの上限に近い.

☆ cosmic string (1)

stringのエネルギー密度

$$\rho_s = \frac{\mu}{\xi_s^2}$$

μ → 単位長さあたりのエネルギー

ξ_s^2 → 長さスケール

ξ_sの時間発展を $\xi_s \propto t^\alpha$とすると

$\rho_s \propto t^{-2\alpha}$　　$\alpha \leq 1$ (causality)

宇宙のmatter. radiation ： $\rho \propto t^{-2}$

$\alpha = 1$でないと string-dominatedとなり
宇宙が非等方になる

$\alpha = 1$ 「スケーリング」 $\rho_s \propto \frac{\mu}{t^2}$

stringのエネルギー損失

$$\dot{\rho}_s = \dot{\rho}_{s.exp} + \dot{\rho}_{s,loss}$$

$$\dot{\rho}_s = -2\frac{\rho_s}{t} \qquad \dot{\rho}_{s.exp} = \begin{cases} -\frac{\rho_s}{t} & (RD) \\ -\frac{4}{3}\frac{\rho_s}{t} & (MD) \end{cases}$$

「スケーリング」に至るには stringは何らかの形で
エネルギーを失うべきで

$$\dot{\rho}_{s.loss} = \begin{cases} -\frac{\rho_s}{t} & (RD) \\ -\frac{2}{3}\frac{\rho_s}{t} & (MD) \end{cases}$$

☆ cosmic string (2)

エネルギー損失 $\rho_{s.loss}$ で X 粒子を生めばよい.

方法

- loopの形成

  string の self-interact で loop を作る.

loopが重力放射でエネルギーを失い消滅する時
X 粒子を作る.

→ 不十分 (エネルギーのほとんど重力放射で消える)

- cuspの消滅

  string の一部分が光速で動くと曲率半径が
極めて小さくなり self-interact して decay

→ 不十分

- loop の連続生成

  loop → 2つの loop → 4つの loop → …

GUT scale の cosmic string ($\mu \sim (10^{16}\,\mathrm{GeV})^2$)
であれば loopのエネルギーの 10^{-4} 程度が X 粒子
になればいい.

☆ monopolonium

monopole-antimonopole bound state.

古典的エネルギー

$$E = \frac{1}{2}\left(\frac{m_M}{2}\right)\omega^2 r^2 - \frac{\alpha_m}{r}$$

eq. of. motion

$$\frac{\alpha_m}{r} = \frac{m_M}{2}\omega^2 r^2$$

古典的には不安定だが，量子論的には "Bohr model" が作れ

$$r = n^2 a_m^B \qquad a_m^B = \frac{1}{\alpha_m}\left(\frac{2}{m_M}\right)$$

ground stateの半径は monopoleの半径より小さい．nが十分小さいと対消滅．

宇宙初期にnが十分大きい monopoloniumが生成され現在decayすればよい．

monopoloniumは磁気的に中性．
銀河ハローに集中している
(superheavy DMと同じ)

☆ cosmic necklace

cosmic string 上に monopole が並んだもの.

$$G \xrightarrow{} H \times U(1) \xrightarrow{} H \times Z_2$$

monopole 生成　　Z_2 string 生成

necklace の時間発展は r で決まり

$$r \equiv \frac{m}{\mu d}$$

m — monopole の mass

d — monopole の間隔

$r \ll 1$: monopole は効かない.

$r \gg 1$: monopole が運動を支配.
necklace は小さな loop に分裂し
monopole 消滅で X-粒子が生じる

$r \gg 1$ に向かって necklace が進化するなら

$$\dot{n}_X \sim \frac{r^2 \mu}{m_X t^3}$$

$r^2 \mu \sim O(10^{28}\,\mathrm{GeV}^2)$ なら OK

§ Summary

・Top-downシナリオで超高エネルギー宇宙線を説明するには superheavy DMか topological defect が用いられる

・superheavy DMを用いる場合その長寿命を実現させるメカニズムが必要。

→ Standard Modelを超える物理？