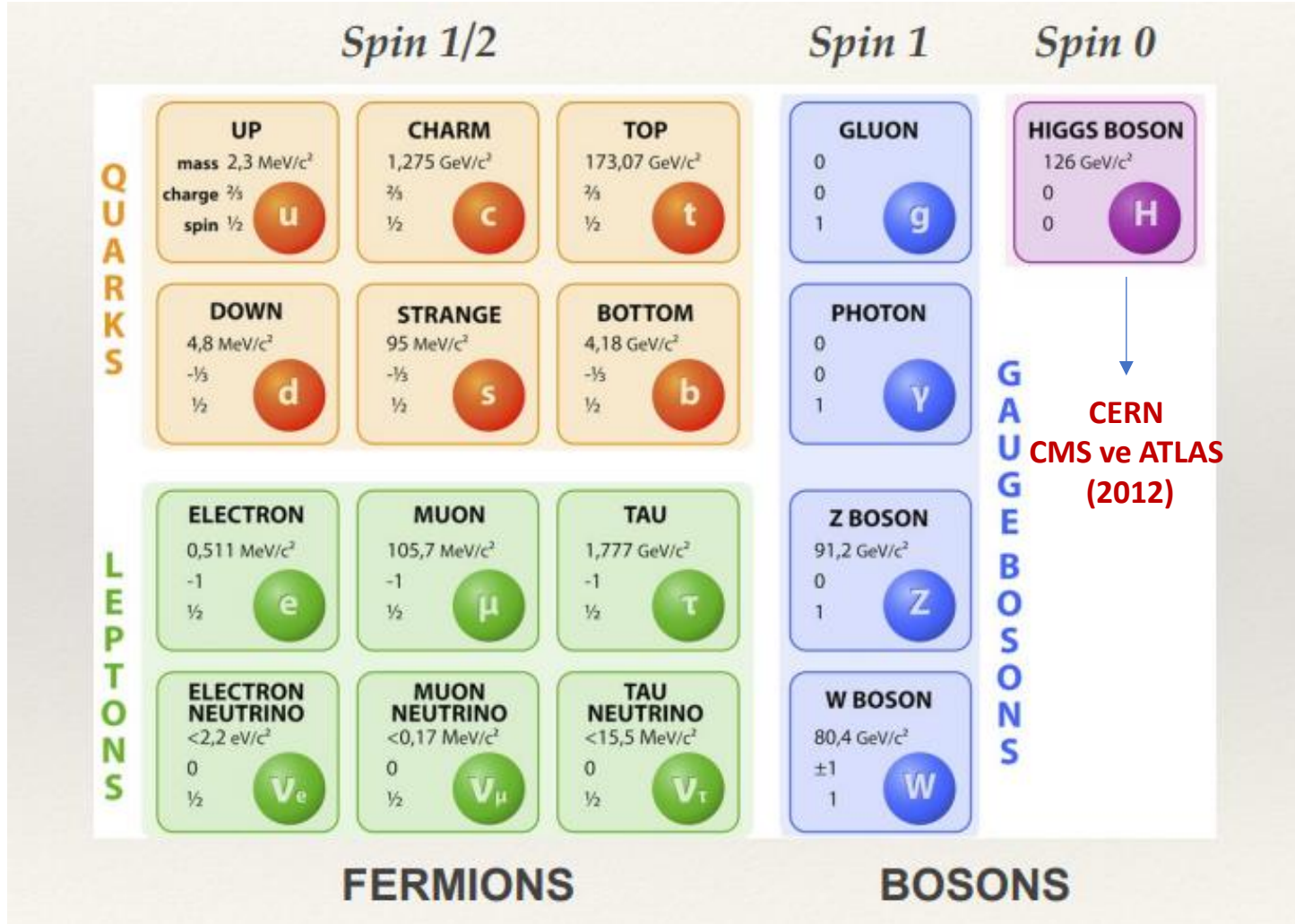

Vakum Stabilitesi ve Nötrino kütlesi

Minimal bir Yaklaşım

Canan Nurhan KARAHAN
Milli Savunma Üniversitesi

YEFİST-2025
Marmara Üniversitesi
25 Mayıs 2025

Standard Model



STANDARD MODEL

Renormalize edilebilen QFT
Planck ölçeğine kadar geçerli EFT

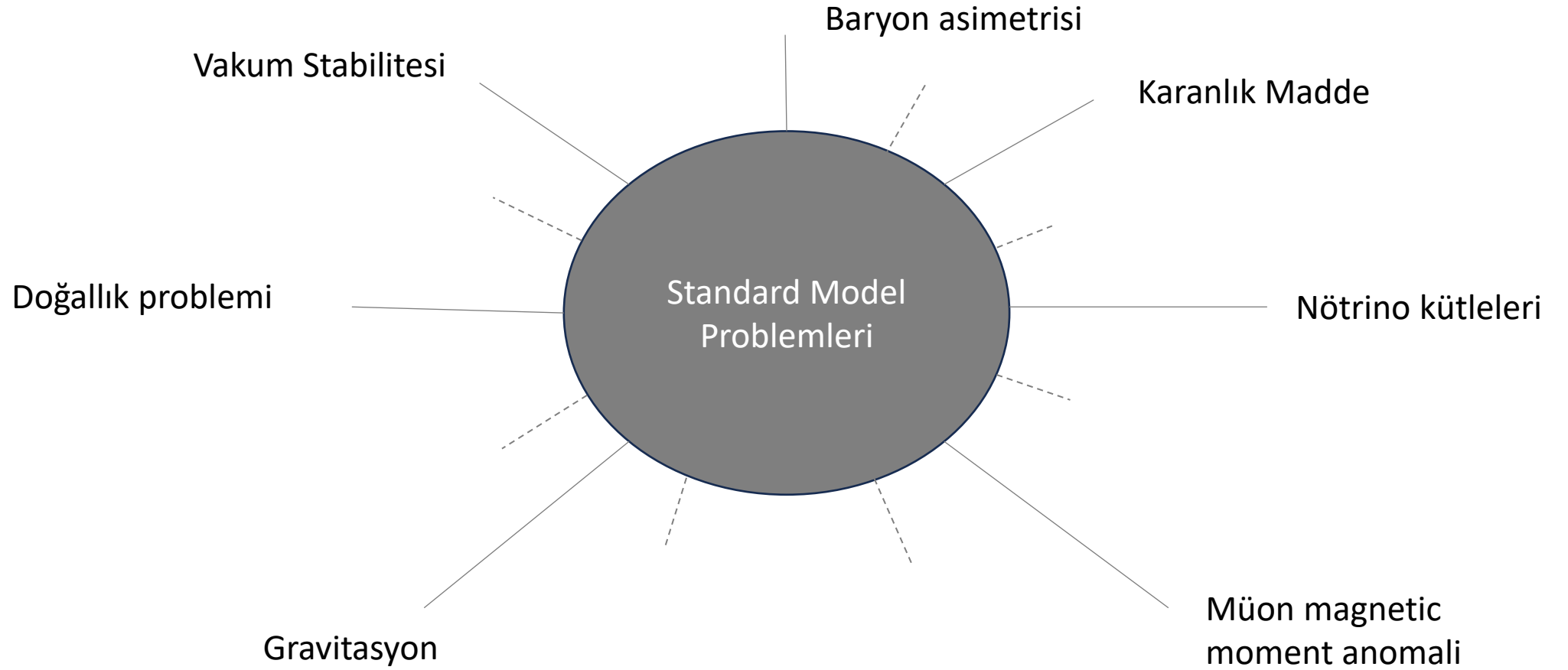
$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

- Güçlü etkileşim
- Zayıf etkileşim
- Elektromanyetik etkileşim

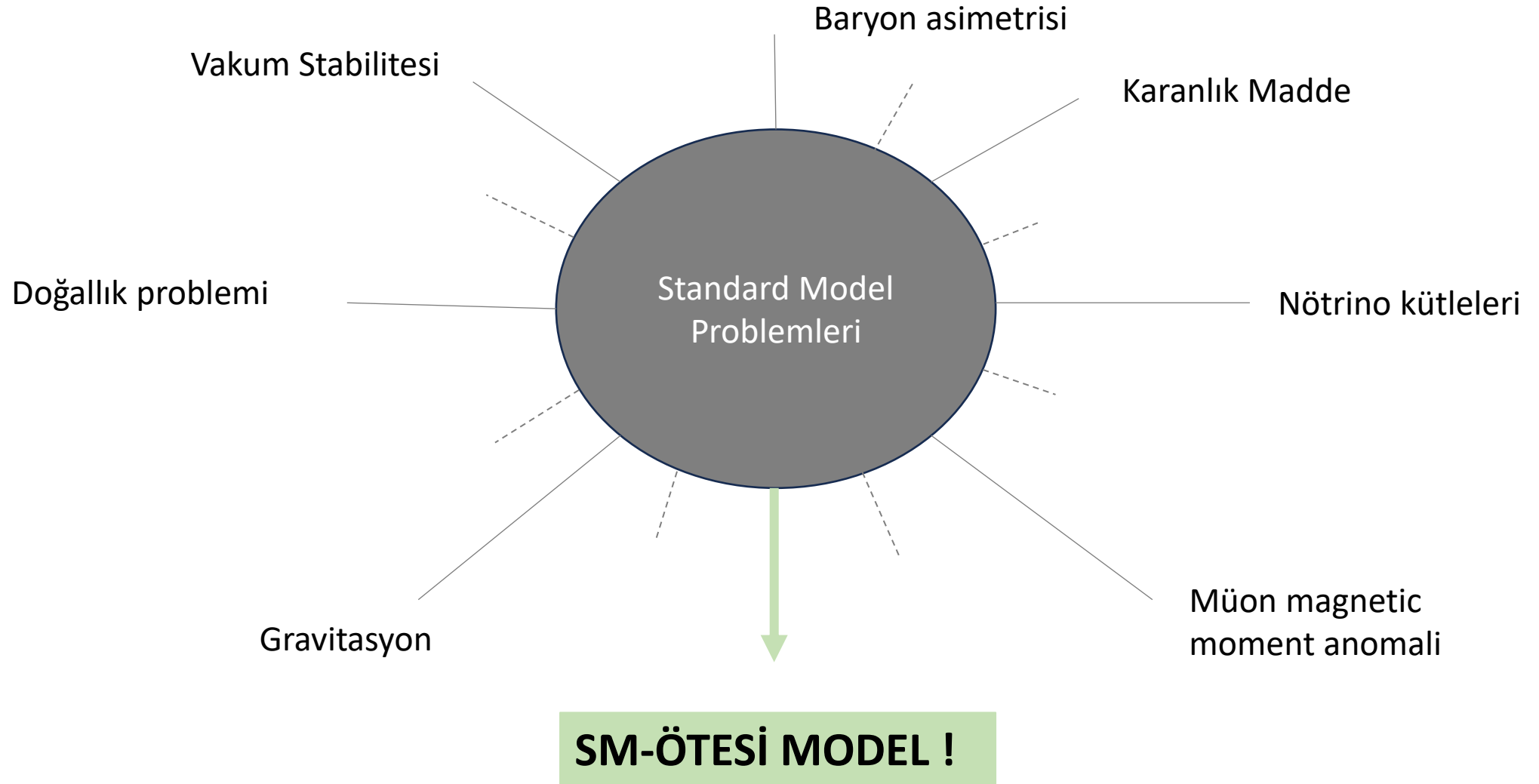
$$L_{SM} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\Psi}\gamma^\mu D_\mu\Psi + h.c. + \bar{\Psi}i\gamma_{ij}\Psi_j\varphi + h.c. + |D_\mu\varphi|^2 - V(\varphi)$$

Elektrozayıf ölçekte ve hatta birkaç TeV enerjilere kadar deneylerle oldukça uyumlu !

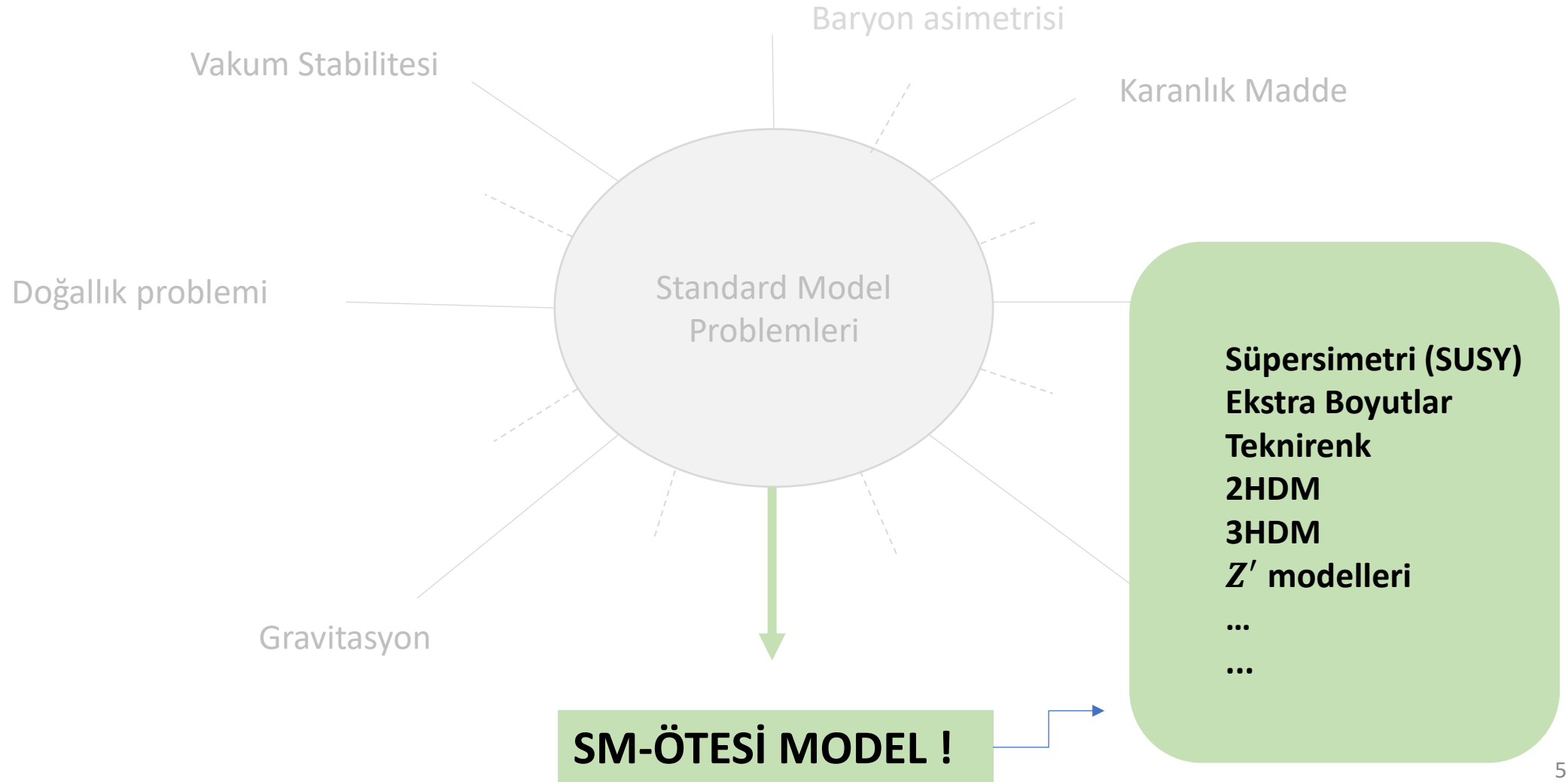
Standart Model ve Problemleri



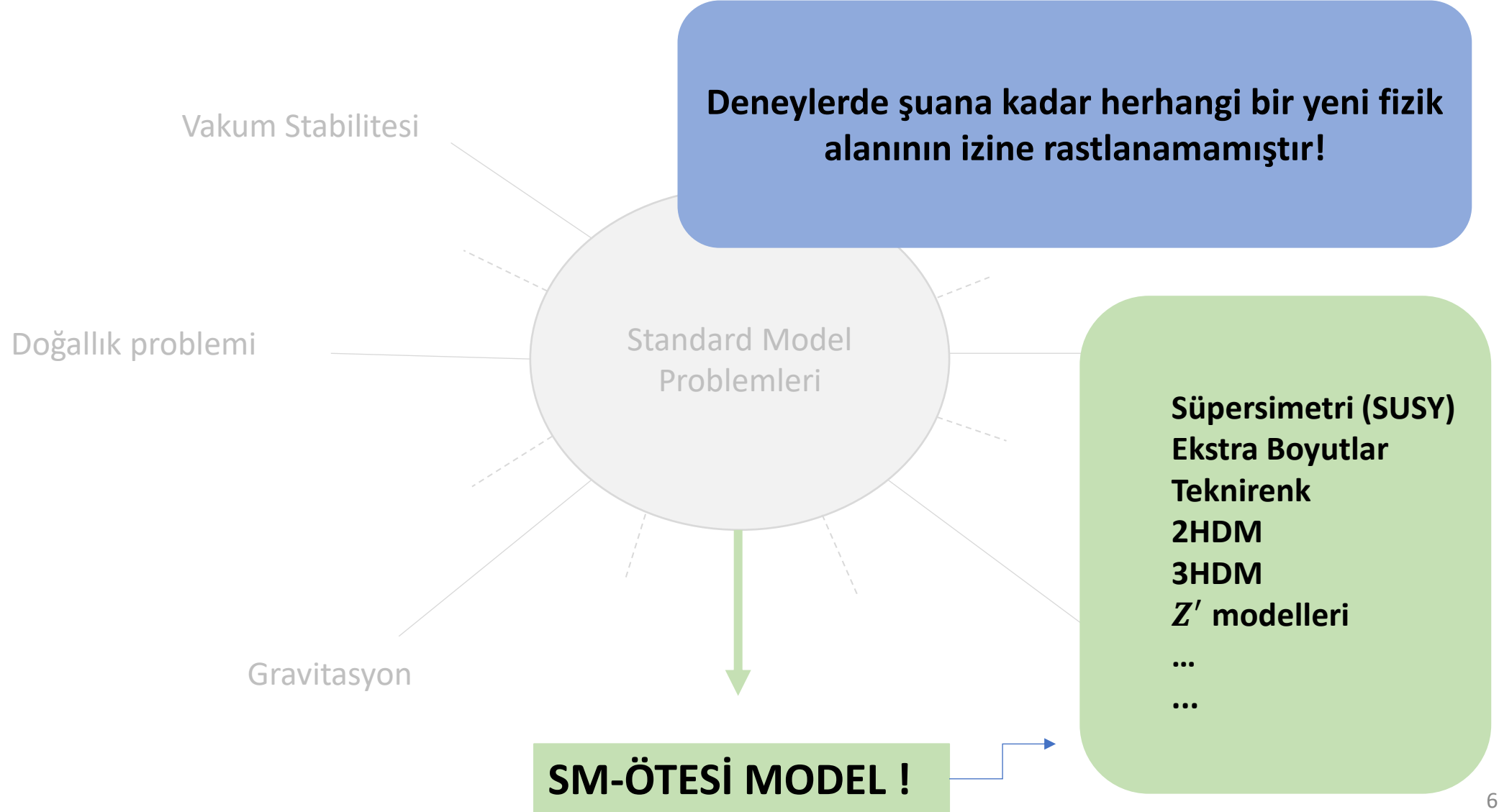
Standart Model ve Problemleri



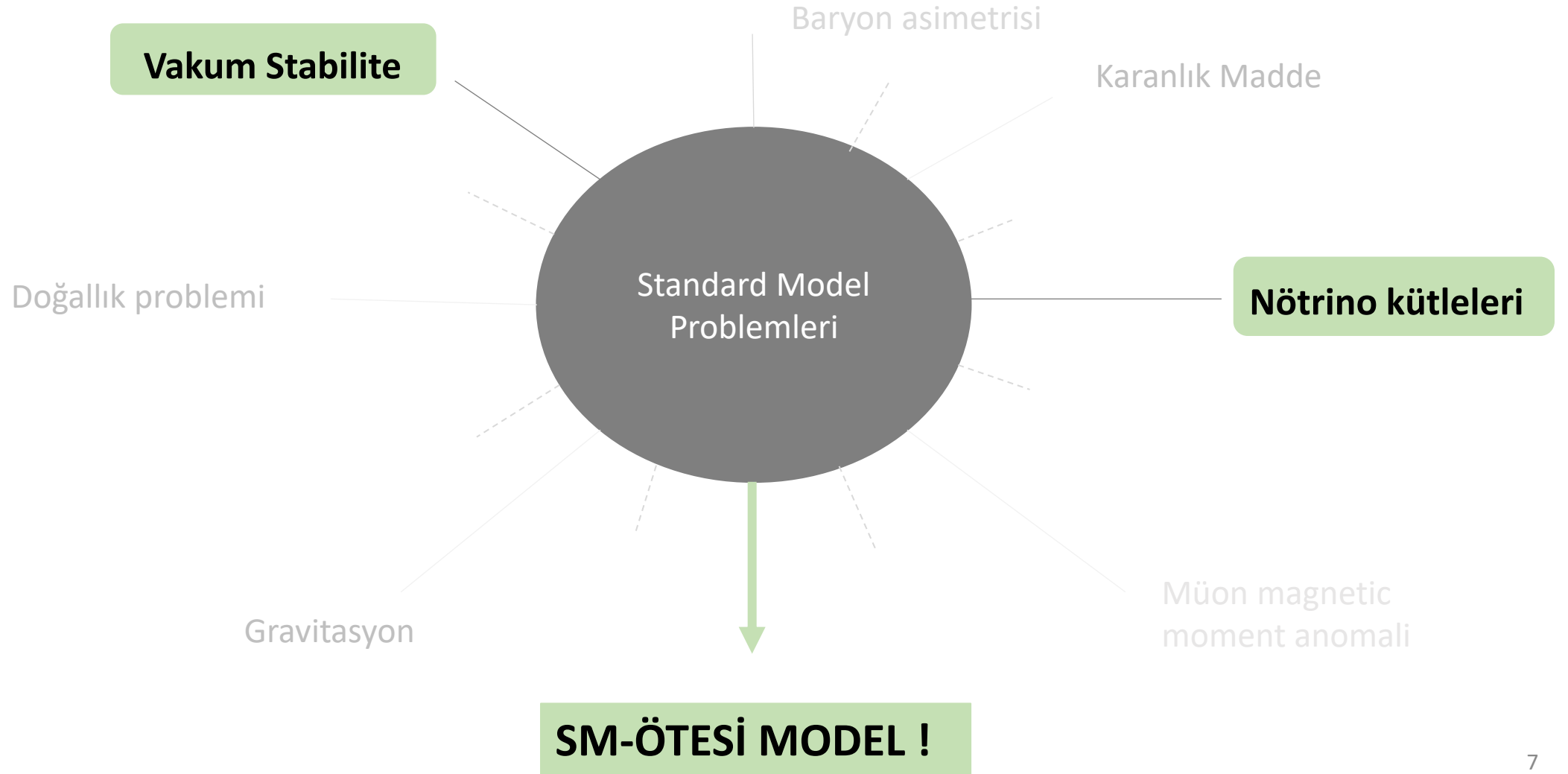
Standart Model ve Problemleri



Standart Model ve Problemleri



Standart Model ve Problemleri



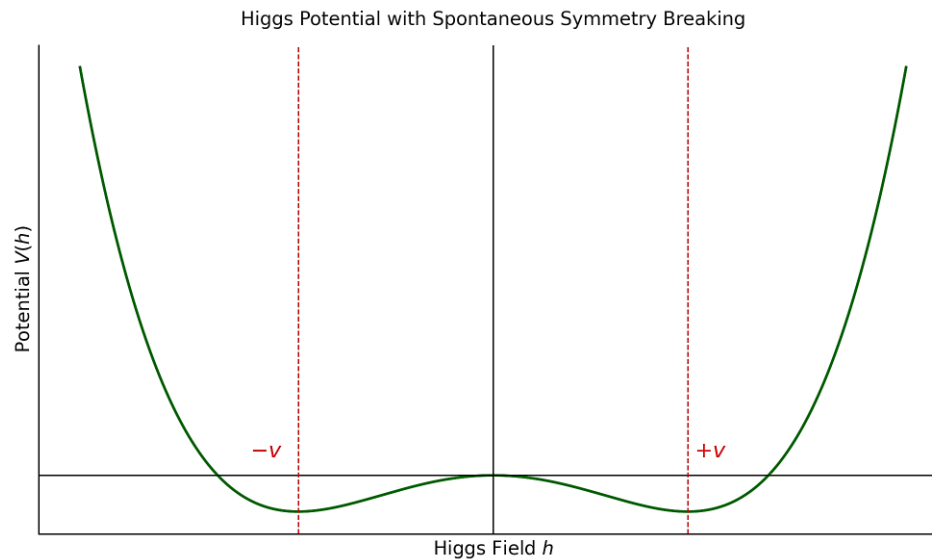
Vakum Stabilite Problemi

- SM Higgs alanı potansiyeli:

$$V(H) = -\mu_H^2 |H|^2 + \lambda |H|^4$$

Kendiliğinden simetri kırılımı: $\rightarrow \mu_H^2 > 0$

Elektrozayıf vakumun kararlı olması $\rightarrow \lambda(\mu) > 0$ ($0 \leq \mu \leq 10^{19}$ GeV)



Kuantum düzeltmeleri kuartik kuplajın enerji ile değişimini önemli ölçüde etkiler ve bu değişim **Renormalizasyon Grup Denklemleri (RGE)** tarafından belirlenir.

Higgs kuartik kuplaj tek-döngü RGE

$$\beta_\lambda \rightarrow \frac{d\lambda}{d\ln\mu} = \frac{1}{16\pi^2} \left[24\lambda^2 - 6y_t^4 + \lambda(12y_t^2 - 9g_2^2 - 3g_1^2) + \frac{3}{8}(2g_2^4 + (g_2^2 + g_1^2)^2) \right]$$

Higgs kendi kendine etkileşimi

Top kuark döngüsü

Yukawa ve gauge ile karışık katkı

Gauge bozon katkısı

g_2 : $SU(2)_L$ gauge kuplajı

g_1 : $U(1)_Y$ gauge kuplajı

y_t : top kuark Yukawa kuplajı

SM Renormalizasyon Grup Denklemleri

$$\beta_\lambda \rightarrow \frac{d\lambda}{d\ln\mu} = \frac{1}{16\pi^2} \left[24\lambda^2 - 6y_t^4 + \lambda(12y_t^2 - 9g_2^2 - 3g_1^2) + \frac{3}{8}(2g_2^4 + (g_2^2 + g_1^2)^2) \right]$$

$$\beta_{g_1} = \frac{1}{16\pi^2} \left[\frac{41}{6} g_1^3 \right]$$

$$\beta_{g_2} = \frac{1}{16\pi^2} \left[-\frac{19}{6} g_2^3 \right]$$

$$\beta_{g_3} = \frac{1}{16\pi^2} \left[-7g_3^3 \right]$$

$$\beta_{y_t} = \frac{y_t}{16\pi^2} \left[\frac{9}{2} y_t^2 - 8g_3^2 - \frac{9}{4} g_2^2 - \frac{17}{12} g_1^2 \right]$$

Kuantum düzeltmeleri kuartik kuplajın enerji ile değişimini önemli ölçüde etkiler ve bu değişim **Renormalizasyon Grup Denklemleri (RGE)** tarafından belirlenir.

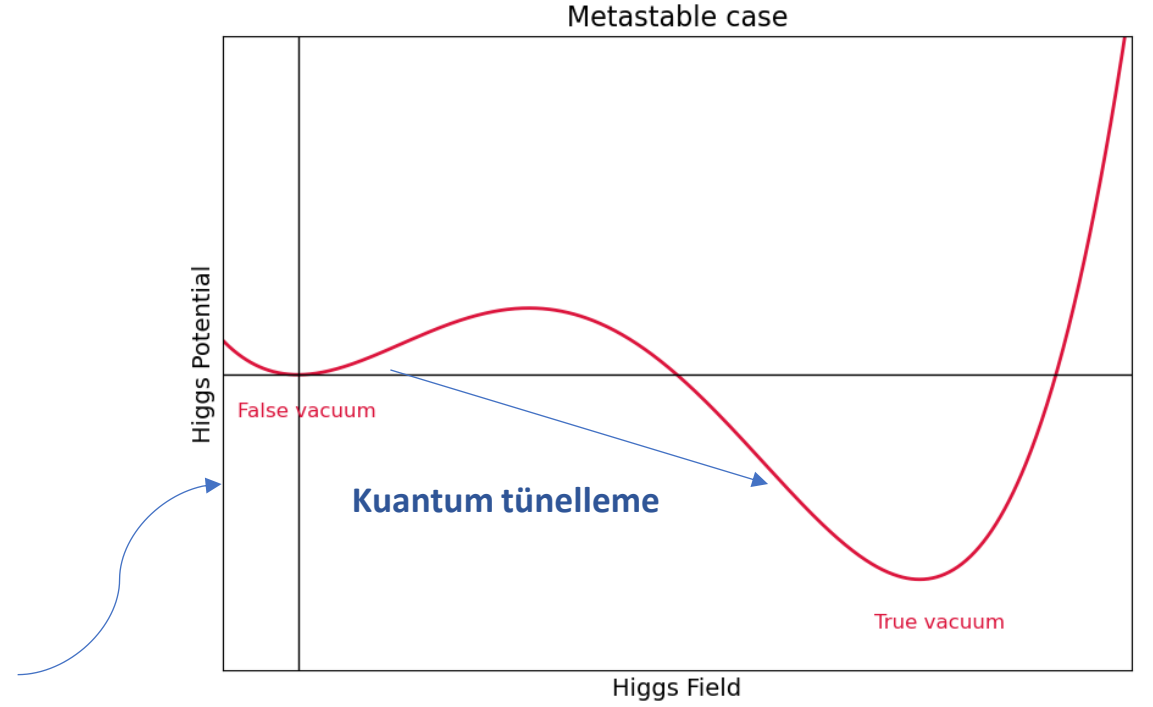
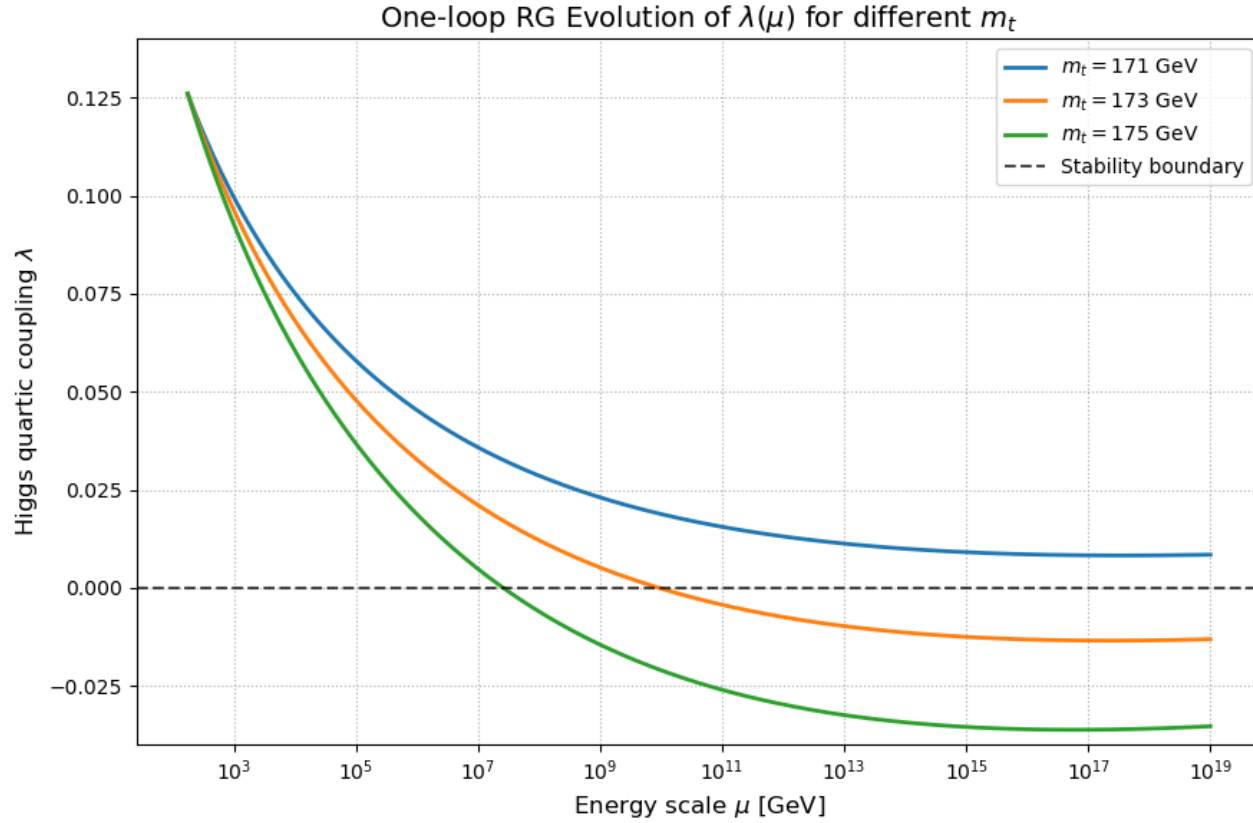
Higgs kuartik kuplaj tek-döngü RGE

$$\beta_\lambda = \frac{1}{16\pi^2} \left[24\lambda^2 + 12y_t^2\lambda - 6y_t^4 - 9\lambda \left(g_2^2 + \frac{1}{3}g_1^2 \right) + \frac{9}{8}g_2^4 + \frac{3}{8}g_1^4 + \frac{3}{4}g_2^2g_1^2 \right]$$

Ölçülen Higgs kütlesi $m_h \approx 125 \text{ GeV}$ ve top kuark kütlesi $m_t \approx 173 \text{ GeV}$

$$\mu \gtrsim 10^{10} \text{ GeV} \rightarrow \lambda(\mu) < 0$$

METASTABİL VAKUM !



Hacim başına birim zamanda tünelleme olasılığı

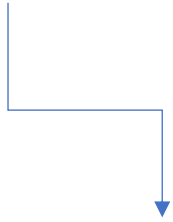
$$\Gamma/V \propto \mu^4 \exp\left[-\frac{8\pi^2}{3|\lambda_{eff}|}\right]$$

$$\tau \propto \left(\frac{1}{\Gamma/V}\right)^{\frac{1}{4}} \rightarrow 10^{536} \text{ s} \gg T_U \approx 4.35 \times 10^{17} \text{ s}$$

METASTABİL VAKUM AMA GÜVENLİ !

Nötrino Kütle Problemi

Standart Model → Kütlesiz Nötrinolar



Nötrino Salınım gözlemleri → $m_\nu \neq 0$ (Fukuda vd. [Super-Kamiokande Collaboration], 1998; SNO Collaboration, 2001)

ÇÖZÜM: Standart Model + Sağ-elli Nötrino (SM+RHN)

RHN ile genişletilmiş Standart Model: Tip-I Tahterevalli Mekanizması

$$L_Y = y_N \bar{L} \tilde{H} N_R + \frac{1}{2} M_N \bar{N}_R N_R \rightarrow m_\nu = \frac{y_N^2 v_H^2}{2M_N} \xrightarrow[\substack{y_N = 0.5 \\ v_H \simeq 246 \text{ GeV}}]{\hspace{1cm}} M_N \simeq 10^{14} \text{ GeV}$$



$\sim 0.12 \text{ eV}$ S. Navas et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 110, 030001 (2024)

SM+RHN

→ Nötrino kütle problemi ✓

Vakum Stabilite problemi ?

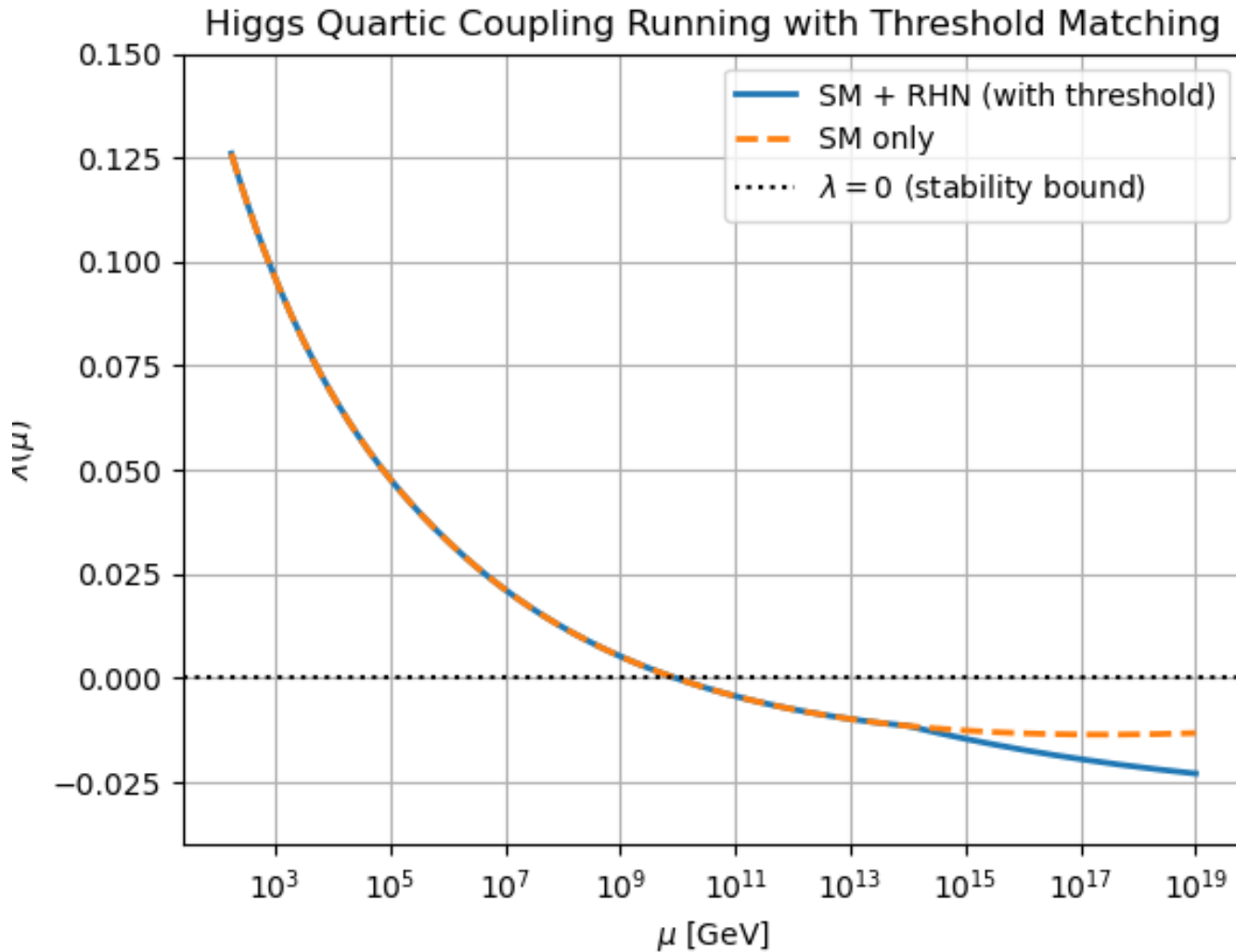
$$\beta_{y_N} = \frac{y_N}{16\pi^2} \left[3y_N^2 - \frac{9}{4}g_2^2 - \frac{3}{4}g_1^2 \right]$$

$$\beta_\lambda = \frac{1}{16\pi^2} \left[24\lambda^2 - 6y_t^4 - 2y_N^4 + \lambda(12y_t^2 - 9g_2^2 - 3g_1^2 + 4y_N^2) + \frac{3}{8}(2g_2^4 + (g_2^2 + g_1^2)^2) \right]$$

Vakum Stabilite Problemi : SM+RHN

Nötrino kütle problemi ✓

Vakum Stabilite problemi ✗



$$y_N(M_N) = 0.5 \longrightarrow M_N = 10^{14} \text{ GeV}$$

$$g_1(M_Z) = 0.357$$

$$g_2(M_Z) = 0.652$$

$$g_3(M_Z) = 1.21$$

$$\lambda(M_Z) = 0.126$$

$$\lambda(\mu = 10^{19}) = -0.013$$

$$\lambda(\mu = 10^{19}) = -0.023$$

ÇÖZÜM: Standart Model + Sağ-elli Nötrino + Vektör-Benzeri Kuark (SM+RHN+VLQ)

Nedir bu VLQ ?

SM dışı fermiyonlar !

Vektör benzeri → Sol-elli ve Sağ-elli bileşenleri SM simetrileri altında aynı şekilde dönüşüyorlar.

SM kuarklar gibi renk yüküne sahipler.

SM ayar simetrileri ($SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$) altındaki davranışlarına göre **singlet** ($SU(2)_L = 1$), **doublet** ($SU(2)_L = 2$), ve **triplet** ($SU(2)_L = 3$) yapıda olabilirler.

Isosinglet up-type VLQ : T → (3, 1, +2/3)

$$L_T = \bar{T}(i\gamma^\mu D_\mu - M_T)T - y_T \bar{Q}_L \tilde{H} T_R + h.c.$$



$$D_\mu = \partial_\mu - ig_3 T^a G_\mu^a - ig_1 Y B_\mu$$

Doğrudan W^\pm ve Z alanları ile etkileşimi yok!

Vakum Stabilite Problemi : SM+RHN+VLQ

$$\beta_{g_1} = \frac{1}{16\pi^2} \left[\left(\frac{41}{6} + \frac{16}{15} \right) g_1^3 \right]$$

$$\beta_{g_2} = \frac{1}{16\pi^2} \left[-\frac{19}{6} g_2^3 \right]$$

$$\beta_{g_3} = \frac{1}{16\pi^2} \left[\left(-7 + \frac{2}{3} \right) g_3^3 \right]$$

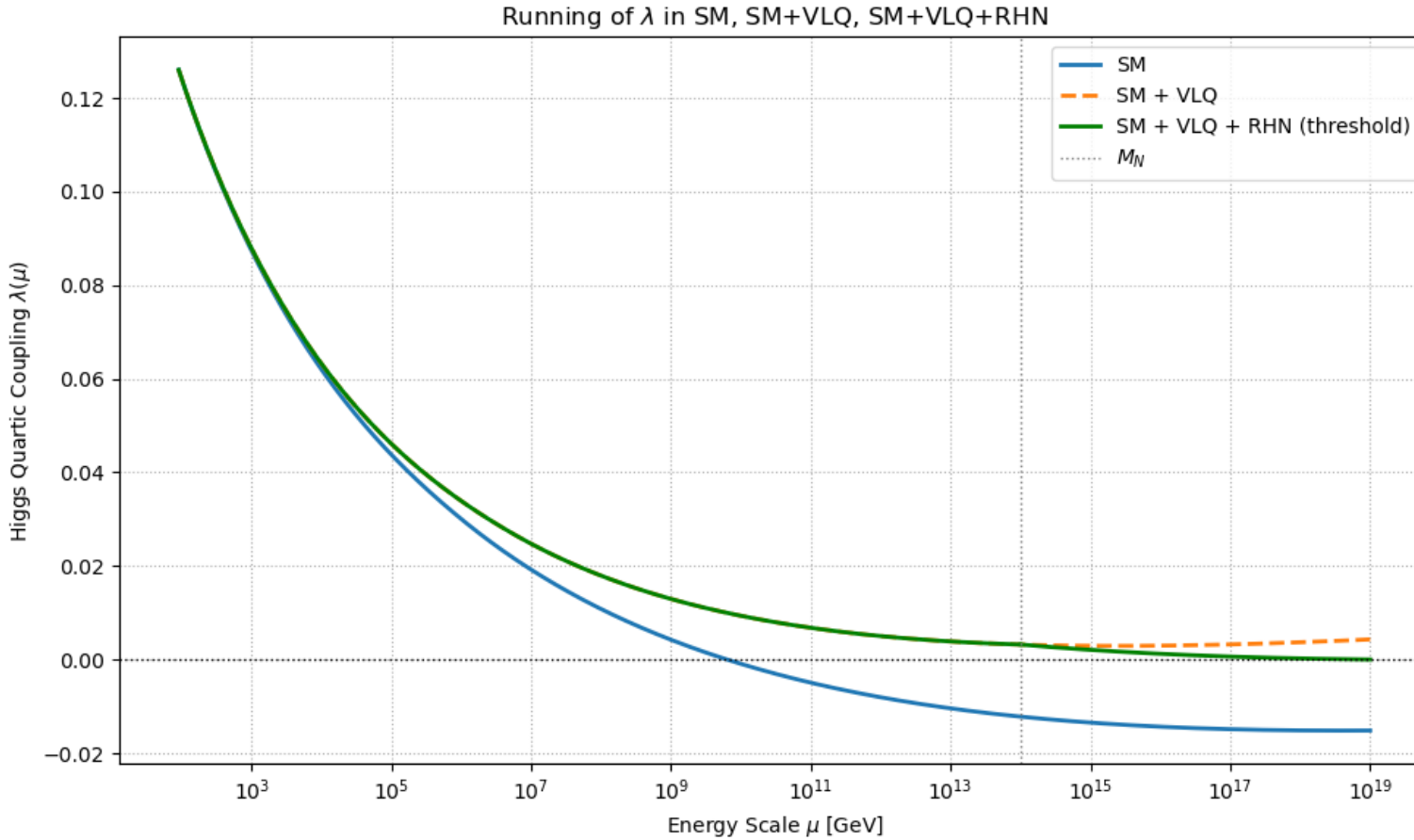
$$\beta_{y_t} = \frac{y_t}{16\pi^2} \left[3y_T^2 + \frac{9}{2}y_t^2 - 8g_3^2 - \frac{9}{4}g_2^2 - \frac{17}{12}g_1^2 \right]$$

$$\beta_{y_T} = \frac{y_T}{16\pi^2} \left[3y_t^2 + \frac{9}{2}y_T^2 - 8g_3^2 - \frac{9}{4}g_2^2 - \frac{17}{12}g_1^2 \right]$$

$$\beta_\lambda = \frac{1}{16\pi^2} \left[24\lambda^2 - 6y_t^4 - 2y_N^4 - 3y_T^4 + \lambda(12y_t^2 + 4y_N^2 + 6y_T^2 - 9g_2^2 - 3g_1^2) + \frac{3}{8}(2g_2^4 + (g_2^2 + g_1^2)^2) \right]$$

SM+RHN+VLQ: Nötrino kütle problemi ✓

Vakum Stabilite problemi ✓



$$y_T(M_T) = 0.196 \xrightarrow{\sin\theta_L = 0.022} M_T = 1.5 \text{ TeV}$$

$$y_N(M_N) = 0.5 \longrightarrow M_N = 10^{14} \text{ GeV}$$

$$g_1(M_Z) = 0.357$$

$$g_2(M_Z) = 0.652$$

$$g_1(M_Z) = 1.21$$

$$\lambda(M_Z) = 0.126$$

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

$$\lambda \simeq 10^{-5}$$

$$\lambda \simeq -0.013$$

SM

Nötrino Kütle Problemi
Vakum Stabilite Problemi

ÇÖZÜM

SM+RHN

Vakum Stabilite Problemi

ÇÖZÜM

SM+RHN+VLQ

Nötrino kütle problemi ✓

$$y_N(M_N) = 0.5 \longrightarrow M_N = 10^{14} \text{ GeV}$$

Vakum Stabilite problemi ✓

$$y_T(M_Z) = 0.196 \longrightarrow M_T = 1.5 \text{ TeV}$$
$$\sin\theta_L = 0.022$$

Deneysel kısıtlar:

Kütle üzerindeki kısıt: $M_T \geq 1.3-1.5 \text{ TeV}$

Karışım açısı üzerindeki kısıt: $\sin\theta_L \leq 0.03$

Sonuçlar ve Yorumlar

- SM+RHN modeli: $y_N = 0.5 \rightarrow M_N \simeq 10^{14} \text{ GeV}$

Nötrino kütle problemi ✓

Vakum Stabilite problemi ✗

Nötrino kütle problemini çözmesine rağmen vakum stabilite problemini daha da kötüleştirmektedir.

- SM+RHN+VLQ modeli: $y_N = 0.5 \rightarrow M_N \simeq 10^{14} \text{ GeV}$ ve $y_T \geq 0.196 \rightarrow M_T \geq 1.5 \text{ TeV}$

Nötrino kütle problemi ✓

Vakum Stabilite problemi ✓

VLQ için deneysel izinli bölgelerde vakum stabilizasyonunu çözecek parametre uzayı bulunabilmektedir.

Teşekkürler...