Netiesioginės pataisos, kai $m_W \neq \cos\theta_W m_Z$

(2305.14050 pagrindu)

Vytautas Dūdėnas[1], Simonas Draukšas[1], Luis Lavoura[2]

[1]Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, fizikos fakultetas, Vilniaus universitetas
[2]Lisabonos Technikos Universitetas

June 15, 2023

Netiesioginiai (oblique) parametrai

- Elektrosilpasis (EW) sektorius Standartiniame modelyje (SM) yra stipriai apribotas:
  - iš 3 išmatuotų dydžių (įvadinių stebimųjų), pvz. (G_F, α, m_Z), SM duoda prognozes visiems kitiems EW stebimiesiems (Z skilimai, $\sin\theta_W^{\text{effective}}$, ρ_*, g_L,g_R....)
- Tarkime turime modelį už SM (BSM), su tokiomis savybėmis:
  - Tik $SU(2) \times U(1)$ kalibruotiniai laukai
  - Galioja $m_W = \cos\theta_W m_Z$ nuliniam (medžio) artiny.
- **Netiesioginiai** (angl. oblique) parametrai, $S, T, U \in \mathbb{R}$, parametrizuoja skirtumą SM prognozės stebimąjam O_{SM} ir BSM prognozės O_{BSM}[Peskin 1992]:

$$O_{BSM} = O_{SM}(1 + a_1 S + a_2 T + a_3 U),$$

kur $a_i \in \mathbb{R}$ yra koeficientai, priklausantys nuo stebimojo.

SM medžio lygmeny

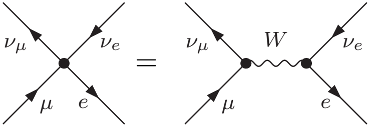
- Weinberg'o kampas:

$$s \equiv \sin\theta_W\,, \qquad c \equiv \cos\theta_W$$

$$A_\mu = cB_\mu + sW_\mu^3\,, \qquad Z_\mu = cW_\mu^3 - sB_\mu$$

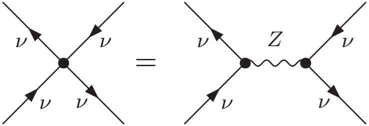
- Visus medžio lygmens dydžius žymėsime su stogeliu.
- Fermi konstanta gali būti išmatuota iš $\mu \to e\nu\nu$ skilimo:

$$\widehat{G}_{F(charged)} = \frac{\sqrt{2}\,\widehat{e}^2}{8\widehat{s}^2\,\widehat{m}_W^2} \qquad \Leftrightarrow$$



- Analogiškai (iš principo), $\nu\nu \to \nu\nu$:

$$\widehat{G}_{F(neutral)} = \frac{\sqrt{2}\,\widehat{e}^2}{8\widehat{s}^2\,\widehat{c}^2\,\widehat{m}_Z^2} \qquad \Leftrightarrow$$



ρ ir ρ_*

- Veltman'o parametras medžio lygmeny:

$$\widehat{\rho} = \frac{\widehat{G}_{F(neutral)}}{\widehat{G}_{F(charged)}} = \frac{\widehat{m}_W^2}{\widehat{c}^2 \widehat{m}_Z^2}$$

- SM Higgso potencialo "apsauginė" $SU(2)$ simetrija, lemia $\widehat{\rho} = 1$.
- Veltman'o parametras aukštesnėje eilėje:

$$\rho \equiv \frac{m_W^2}{c^2 m_Z^2} = \widehat{\rho}\,(1 + \text{kilpos})\;,$$

- Taip pat, "ro-star" parametras:

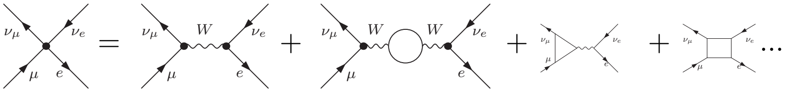
$$\rho_* \equiv \frac{G_{F(neutral)}}{G_{F(charged)}} = \widehat{\rho}\,(1 + (\text{kitos})\ \text{kilpos})$$

- ρ priklauso nuo kuriuos 3 EW parametrus imsi kaip "įvesties", bei $\rho \neq \rho_*$
- Abi lygtys yra modelio **prognozės**, kai $\widehat{\rho} = 1$.

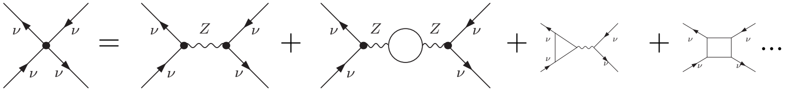
ρ_* pataisos

- Vienos kilpos lygmeny, Fermi konstantos gauna "**netiesiogines**" pataisas, t.y. ateinančias iš kalibruotinių laukų propagatoriaus pataisų (žema energija $p^2 \approx 0$):

$$G_{F(charged)} = \widehat{G}_{F(charged)} \left(1 - \frac{\Pi_{WW}(0)}{m_W^2} + \triangle + \square \right)$$



$$G_{F(neutral)} = \widehat{G}_{F(neutral)} \left(1 - \frac{\Pi_{ZZ}(0)}{m_Z^2} + \triangle + \square \right),$$



$\triangle + \square$ yra trikampių ir dėžių("tiesioginių" pataisų) diagramos, kurias vėliau galima bus atmesti.

- Padalinam vieną iš kito:

$$\rho_* = \frac{G_{F(neutral)}}{G_{F(charged)}} = \frac{\widehat{G}_{F(neutral)}\left(1 - \frac{\Pi_{ZZ}(0)}{m_Z^2} + \triangle + \square\right)}{\widehat{G}_{F(charged)}\left(1 - \frac{\Pi_{WW}(0)}{m_W^2} + \triangle + \square\right)}$$

$$= \widehat{\rho}\left(1 + \frac{\Pi_{WW}(0)}{m_W^2} - \frac{\Pi_{ZZ}(0)}{m_Z^2} + O(2 \text{ kilpos}) + \triangle + \square\right)$$

- SM $\widehat{\rho} = 1$, tada $(\rho_*)_{SM}$ yra apskaičiuojama SM prognozė iš (G_F, α, m_Z) ir baigtinių kilpų pataisų.
- Kai $\widehat{\rho}$ yra laisvas parametras, ρ_* nebėra prognozė, nes ρ_* priklauso nuo $\widehat{\rho}$
  $\Rightarrow$kilpų pataisos nebėra baigtinės
  $\Rightarrow$reikia papildomo įvesties parametro apibrėžti $\widehat{\rho}$ (t.y. pernormuoti ρ parametrą).

ρ_* pataisos, kai $\widehat{\rho} = 1$, ir parametras T

$$\rho_* = \widehat{\rho}\left(1 + \frac{\Pi_{WW}(0)}{m_W^2} - \frac{\Pi_{ZZ}(0)}{m_Z^2} + \triangle + \square\right) \tag{1}$$

- Tarkime turime SM prognozę $(\rho_*)_{SM}$ ir BSM, kuriam taip pat galioja $\widehat{\rho} = 1$, prognozę $(\rho_*)_{BSM}$
- Tada abu $(\rho_*)_{SM}$ and $(\rho_*)_{BSM}$ apskaičiuojami iš (1).
- Padalinam vieną iš kito, atmetam $\triangle + \square$ (BSM įtaka į juos labai maža[Kennedy&Lynn1989, Peskin1992]) ir $O(2$ kilpos) narius:

$$\frac{(\rho_*)_{BSM}}{(\rho_*)_{SM}} = \underbrace{\frac{\widehat{\rho}_{BSM}}{\widehat{\rho}_{SM}}}_{=1}\left(1 + \frac{\Pi^{new}_{WW}(0)}{m_W^2} - \frac{\Pi^{new}_{ZZ}(0)}{m_Z^2}\right) \equiv 1 + \alpha T\,,$$

  kur $\Pi^{new} = \Pi^{BSM} - \Pi^{SM}$, t.y. **tik** BSM postuluotų naujų dalelių indėlis į savienergiją.
- T yra **netiesioginis** parametras.

Netiesioginiai parametrai

- Dažniausiai naudojami netiesioginiai parametrai masės tikrinėje bazėje ($\widetilde{\Pi}\left(m^2\right) \equiv \frac{\Pi\left(m^2\right)-\Pi(0)}{m^2}$):

$$S = \frac{4s^2c^2}{\alpha}\left[\widetilde{\Pi}_{ZZ}\left(m_Z^2\right) + \frac{s^2-c^2}{sc}\Pi'_{ZA}(0) - \Pi'_{AA}(0)\right],$$

$$T = \frac{1}{\alpha}\left[\frac{\Pi_{WW}(0)}{m_W^2} - \frac{\Pi_{ZZ}(0)}{m_Z^2}\right],$$

$$U = \frac{4s^2}{\alpha}\left[\widetilde{\Pi}_{WW}\left(m_W^2\right) - c^2\widetilde{\Pi}_{ZZ}\left(m_Z^2\right) - 2sc\Pi'_{ZA}(0) - s^2\Pi'_{AA}(0)\right].$$

ρ apibrėžimai

- Analogiškai, kaip išvedėm ρ_* pataisas, galim išvesti $\rho = \frac{m_W^2}{c^2 m_Z^2}$.
- Kai $\widehat{\rho} = 1$, pasirinkime įvesties parametrus $\left(G_{F(charged)}, \alpha = \frac{e^2}{4\pi}, m_W\right)$
- Tada "matuojamas" c^2 turi būti išreikštas per šiuos dydžius, t.y. pasiimti medžio lygmens lygtį ir ją naudoti kaip c^2 apibrėžimą:

$$\widehat{G}_{F(charged)} = \frac{\sqrt{2}\widehat{e}^2}{8\widehat{s}^2 \widehat{m}_W^2} \longrightarrow 1 - c^2 \equiv \frac{\pi\alpha}{\sqrt{2} G_{F(charged)} m_W^2}$$

- Analogiškai galime pasirinkti ir $\left(G_{F(charged)}, \alpha, m_Z\right)$ [Peskin1992], tada (panaudodami $\widehat{m}_W = \widehat{c}\widehat{m}_Z$!)

$$\widehat{G}_{F(charged)} = \frac{\sqrt{2}\widehat{e}^2}{8\widehat{s}^2 \widehat{c}^2 \widehat{m}_Z^2} \longrightarrow \bar{c}^2\left(1 - \bar{c}^2\right) \equiv \frac{\pi\alpha}{\sqrt{2} G_{F(charged)} m_Z^2}$$

- c ir $\bar{c}$ skiriasi vienoje kilpoje pagal apibrėžimą, taigi taip pat ir ρ ir $\bar{\rho}$!

ρ ir $\bar{\rho}$

- Skaičiuojame $\rho = \frac{m_W^2}{c^2 m_Z^2}$ (T^{pilnas}, reiškia pilnos modelio netiesioginės pataisos).

$$\rho = \frac{m_W^2}{c^2 m_Z^2} = \frac{\widehat{m}_W^2 + \delta m_W^2}{(\widehat{c}^2 + \delta c^2)(\widehat{m}_Z + \delta m_Z^2)} \quad = \widehat{\rho}\left(1 + \alpha T^{\text{pilnas}} - \alpha K^{\text{pilnas}} + \triangle + \square\right)$$

$$\bar{\rho} = \frac{m_W^2}{c^2 m_Z^2} = \frac{\widehat{m}_W^2 + \delta m_W^2}{(\widehat{c}^2 + \delta \bar{c}^2)(\widehat{m}_Z + \delta m_Z^2)} \quad = \widehat{\rho}\left(1 + \frac{\bar{c}^2}{\bar{c}^2 - \bar{s}^2}\left[\alpha T^{\text{pilnas}} - \alpha K^{\text{pilnas}}\right] + \ldots\right)$$

$$K \equiv \frac{1}{2c^2} S + \frac{s^2 - c^2}{4s^2 c^2} U$$

- SM vs. BSM prognozės (kai $\widehat{\rho} = 1$):

$$\rho_{BSM} = \rho_{SM}(1 + \alpha T - \alpha K), \qquad \text{kai įvestis } \left(G_{F(charged)}, \alpha, m_W\right)$$

$$\bar{\rho}_{BSM} = \bar{\rho}_{SM}\left(1 + \frac{\bar{c}^2}{\bar{c}^2 - \bar{s}^2}[\alpha T - \alpha K]\right), \qquad \text{kai įvestis } \left(G_{F(charged)}, \alpha, m_Z\right)$$

kai $\widehat{\rho} \neq 1$

- Tarkim turim "bazinį" modelį BM kurio sudėtingesnis skaliarinis potencialas, ir $\widehat{\rho} \neq 1$, ir "virš bazinio modelio" BBM (taip pat su $\widehat{\rho} \neq 1$).
- Tada
$$\widehat{G}_{F(charged)} = \frac{\sqrt{2}\widehat{e}^2}{8\widehat{s}^2 \widehat{m}_W^2} \neq \frac{\sqrt{2}\widehat{e}^2}{8\widehat{s}^2 \widehat{c}^2 \widehat{m}_Z^2}$$
ir (Peskin naudoti prie $\widehat{\rho} = 1$) $\bar{\rho}$, $\bar{c}$ yra nenaudotini(!).
- Lygtis:
$$\rho = \widehat{\rho}\left(1 + \alpha T^{\text{pilnas}} - \alpha K^{\text{pilnas}} + \triangle + \square\right)$$
nebėra prognozė nei BM nei BBM, kai $\widehat{\rho} \neq 1 \Rightarrow$ reikia papildomo įvesties parametro.
- Įvestis $\left(G_{F(charged)}, \alpha, m_W, m_Z\right)$ pagal apibrėžimą duoda
$$\frac{m_W^2}{c^2 m_Z^2} = \frac{m_W^2}{\left[1 - \frac{\pi\alpha}{\sqrt{2} G_{F(charged)} m_W^2}\right] m_Z^2} = \rho_{BM} = \rho_{BBM} \quad \Rightarrow \quad \frac{\widehat{\rho}_{BBM}}{\widehat{\rho}_{BM}} = (1 - \alpha T + \alpha K)$$

BM vs. BBM

- Prieš tai mes išvedėme:

$$\frac{(\rho_*)_{BSM}}{(\rho_*)_{SM}} = \frac{\widehat{\rho}_{BSM}}{\widehat{\rho}_{SM}}(1+\alpha T) = (1+\alpha T)$$

  nes $\widehat{\rho}_{BSM} = \widehat{\rho}_{SM} = 1$.
- Panaudojant tą pačią lygtį, tik $BSM \to BBM$ ir $BM \to SM$, įstatę $\frac{\widehat{\rho}_{BBM}}{\widehat{\rho}_{BM}} = (1-\alpha T+\alpha K)$ gauname:

$$\frac{(\rho_*)_{BBM}}{(\rho_*)_{BM}} = (1+\alpha K)$$

Rezultatas: kai $\widehat{\rho} \neq 1$, ir naudojame tuos pačius įvesties parametrus $\left(G_{F(charged)}, \alpha, m_W, m_Z\right)$ BM ir BBM, galime naudoti tuos pačius sąryšius stebimiesiems kaip SM/BSM [Peskin1992, Maksymyk1994] tik pakeičiam:

$$T \to K = \frac{1}{2c^2}S + \frac{s^2-c^2}{4s^2c^2}U$$

Santrauka

- Kai $\widehat{\rho} = 1$ tiek SM tiek BSM, seniai išvestos lygtys, kai įvadiniai stebimieji $\left(G_{F(charged)}, \alpha, m_Z\right)$[Peskin 1992]:

$$O_{BSM} = O_{SM}\left(1 + aS + bT + cU\right)$$

- Kai $\widehat{\rho} \neq 1$, galime palyginti du modelius tokiomis pačiomis lygtimis, tik $T \to K$ kai įvadiniai stebimieji $\left(G_{F(charged)}, \alpha, m_Z, m_W\right)$

$$O_{BBM} = O_{BM}\left(1 + a_1 S + a_2\left[\frac{1}{2c^2}S + \frac{s^2 - c^2}{4s^2c^2}U\right] + a_3 U\right),$$

- Palyginti SM($\widehat{\rho} = 1$) su BBM($\widehat{\rho} \neq 1$) yra problemų:
  - Skirtingas skaičius įvesties parametrų nėra suderinamas netiesioginiuose parametruose
  - S,U tampa priklausomi nuo kalibruotės (išbandyta su tripleto (krūvinio ir neutralaus) SM plėtiniais)
  - Dėl skirtingų įvesties parametrų, dėžių ir trikampių diagramos gali nebeišsiprastinti taip, kad duotų mažą efektą...
    $\Rightarrow$būčiau atsargus, interpretuodamas netiesioginius parametrus, naudojamus tokiame kontekste.

Ačiū už dėmesį

Ačiū

Netiesioginiai (Oblique) parametrai (trumpa istorija)

- 1988: Kennedy ir Lynn * schema, skaičiuoti 4-fermi amplitudes
  - Yra 3 Stebimieji $e_*^2\left(q^2=0\right)$ (elektrono krūvis) , $s_*^2\left(q^2=0\right)$ (Weinberg kampo sinusas), $G_{\mu *}\left(q^2=0\right)$ (Fermi konstanta, iš μ gyvavimo trukmės)
  - 4-Fermi amplitudės išreiškiamos per bėgančius $e_*^2\left(q^2\right)$, $s_*^2\left(q^2\right)$, $G_{\mu *}\left(q^2\right)$ (Fermi konstanta, iš μ gyvavimo trukmės).
  - 4-Fermi amplitudės yra baigtinės ir nepriklauso nuo ”renormalizacijos schemos”, kai

$$m_W = \cos\theta_W m_Z$$

    - pastaba: bet priklauso nuo pasirinktų stebimųjų.
- ”Bėgantys” parametrai, $e_*^2\left(q^2\right)$, $s_*^2\left(q^2\right)$, $G_{\mu *}\left(q^2\right)$ priklauso nuo kilpų pataisų
  - Svarbi išvada: reikšmingiausios yra kalibruotinių laukų propagatorių pataisos (netiesioginės)
    - Dėžių ir trikampių diagramos atmestinos
  - Netiesioginės pataisos parametrizuoja sunkios BSM fizikos efektus elektrosilpnąjam sektoriui.

Netiesioginiai (Oblique) parametrai (trumpa istorija)

- 1992 Peskin
  - Imam tik netiesiogines pataisas, kai

$$m_W = \cos\theta_W m_Z$$

  - Imam 3 stebimuosius:

$$G_F, \alpha, m_Z$$

  - žiūrim **tik** į BSM įtaką.
  - Netiesioginės pataisos ateina iš savienergijų $\Pi_{AA}(q^2)$, $\Pi_{ZZ}(q^2)$, $\Pi_{WW}(q^2)$ ir $\Pi_{ZA}(q^2)$
- Žemoje energijoje, skleidžiam apie $q^2 = 0$, bei dėl $\Pi_{AA}(0) = 0$ $\Pi_{ZA}(0) = 0$, turim:

$$\Pi'_{AA}(0), \Pi'_{ZA}(0), \Pi_{ZZ}(0), \Pi_{WW}(0), \Pi'_{ZZ}(0), \Pi'_{WW}(0)$$

- 6 funkcijos - 3 stebimieji (G_F, α, m_Z) = 3 netiesioginiai parametrai, S, T, U, gaunam išraiškas:

$$O_{BSM} = O_{SM}(1 + \alpha S + \beta T + \gamma U)$$

Kiek yra netiesioginių parametrų?

- Panašiai gauname kitus stebimuosius O_{BSM}:

$$O_{BSM} = O_{SM}\left(1 + aT + bS + cU\right)$$

- Netiesioginės pataisos ateina iš fotono, Z, W bozonų savienergijų $\Pi_{AA}\left(q^2\right)$, $\Pi_{ZZ}\left(q^2\right)$, $\Pi_{WW}\left(q^2\right)$ ir pataisos $\Pi_{ZA}\left(q^2\right)$.
- Žemoje energijoje jas skleidžiam apie $q^2 = 0$, BSM ($SU(2) \times U(1)$ kalibruotine teorija) galioja $\Pi_{AA}(0) = 0$ $\Pi_{ZA}(0) = 0$, tada turim 6 koeficientus:

$$\Pi'_{AA}(0)\,, \Pi'_{ZA}(0)\;,\; \Pi_{ZZ}(0)\,, \Pi_{WW}(0)\;,\;\; \Pi'_{ZZ}(0)\,, \Pi'_{WW}(0)$$

- 6 koef. - 3 stebimieji (G_F, α, m_Z) = 3 netiesioginiai parametrai (Peskin'o S, T, U)
- 1994 Maksymyk parametrizuoja skirtumą nuo baigtinio q^2 (išskyrus, A):

$$\Pi'(0) \to \widetilde{\Pi}\left(m^2\right)\;,\; \widetilde{\Pi}\left(m^2\right) \equiv \frac{\Pi\left(m^2\right) - \Pi(0)}{m^2}$$

$\Rightarrow +$ 3 parametrai (X, W, Z), $\propto \Pi'(0) - \widetilde{\Pi}\left(m^2\right)$

Visi parametrai

- STUVWX parametrai:

$$S = \frac{4s^2c^2}{\alpha}\left[\widetilde{\Pi}_{ZZ}\left(m_Z^2\right) + \frac{s^2-c^2}{sc}\Pi'_{ZA}(0) - \Pi'_{AA}(0)\right]$$

$$T = \frac{1}{\alpha}\left[\frac{\Pi_{WW}(0)}{m_W^2} - \frac{\Pi_{ZZ}(0)}{m_Z^2}\right]$$

$$U = \frac{4s^2}{\alpha}\left[\widetilde{\Pi}_{WW}\left(m_W^2\right) - c^2\widetilde{\Pi}_{ZZ}\left(m_Z^2\right) - 2sc\Pi'_{ZA}(0) - s^2\Pi'_{AA}(0)\right]$$

$$V = \frac{1}{\alpha}\left[\Pi'_{ZZ}\left(m_Z^2\right) - \widetilde{\Pi}_{ZZ}\left(m_Z^2\right)\right]$$

$$W = \frac{1}{\alpha}\left[\Pi'_{WW}\left(m_W^2\right) - \widetilde{\Pi}_{WW}\left(m_W^2\right)\right],$$

$$X = \frac{1}{\alpha}\left[\Pi'_{ZA}(0) - \widetilde{\Pi}_{ZA}\left(m_Z^2\right)\right]$$