

# Precyzyjna fizyka w niskich energiach i poszukiwanie nowej fizyki ( $g-2$ ), fizyka zapachów, rzadkie rozpady, EDM i CLFV

Andrzej Bożek

IFJ PAN Kraków

9 Wrzesień 2025

# Poszukiwanie efektów nowej fizyki

## Motywacja:

- Model Standardowy działa niezwykle dobrze, ale wiele zjawisk (ciemna materia, asymetria barionowa) wymaga istnienia nowej fizyki.
- Najlepsze są **ang. “miejsca zerowe” MS**, gdzie tło teoretyczne jest małe i dobrze kontrolowane.
- Szczególnie cenimy obszary **niewrażliwe na silne oddziaływania QCD**, np. asymetrie łamania parzystości.

## Wybrane testy:

- Łamanie CP: EDM (neutron, atomy, molekuły).
- Rzadkie rozpady (K, B, D), procesy CLFV (łamanie zapachu leptonów).
- Precyzyjna elektrosłaba fizyka / łamanie parzystości.

## Obszary uzupełniające

- Neutrino: oscylacje, CEvNS, nie-standardowe oddziaływania (NSI).
- Sektor ciemny: ciemne fotony, aksjony (ALP), lekka ciemna materia.
- Naruszenie liczby barionowej: rozpad protonu, oscylacje  $n-\bar{n}$ .

**Idea:** Łącząc wiele niezależnych pomiarów można budować globalny obraz i testować nowe modele BSM (ang. *Beyond Standard Model*).

# Wprowadzenie do anomalii magnetycznego momentu mionu

## Moment magnetyczny

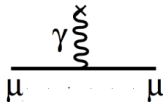
$$\vec{\mu} = g \frac{e}{2m} \vec{S}, \quad \vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

gdzie  $g$  określa częstość precesji spinu w polu magnetycznym  $g = 2$

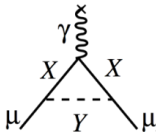
- Dla czystego fermionu Diraca o spinie  $1/2$ :  $g = 2$ .
- Oddziaływania z cząstkami wirtualnymi powodują przesunięcie:  $g > 2$ .
- Anomalia:

$$a_{\mu} = \frac{g_{\mu} - 2}{2}$$

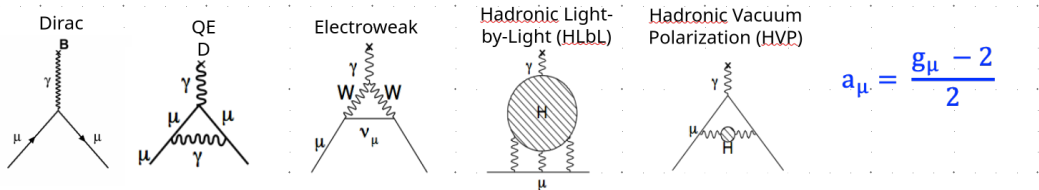
- Cząstki  $X$ ,  $Y$  mogą należeć do Modelu Standardowego lub wynikać z "nowej fizyki" (NF).



$g > 2$



# $a_\mu$ poprawki z Modelu Standardowego



$$a_\mu^{\text{SM}} = a_\mu^{\text{QED}} + a_\mu^{\text{EW}} + a_\mu^{\text{HVP}} + a_\mu^{\text{HLbL}}$$

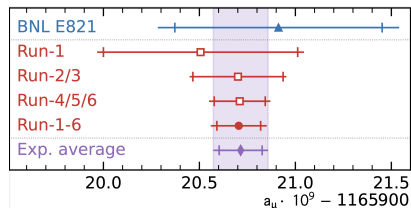
~99.99 %  
~1 ppm  
~59 ppm  
~1 ppm



- $a_\mu^{\text{SM}}$  jest przez przez **g-2 Theory Initiative (TI)**
- Niepewosc teoretyczna jest zdominowana przez poprawki hadronowe, w szczególności przez oddziaływania z próżnią (HVP)

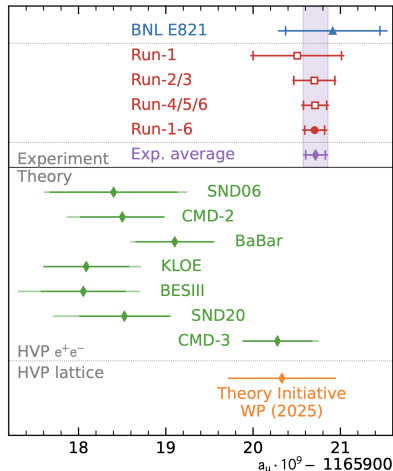
# Fermilab końcowy wynik eksperymentalny – czerwiec 2025

- Osiągnięto precyzję 127 ppb (parts per billion (części na miliard)), lepszą niż zakładane 140 ppb.
- Nowa wartość anomalii mionowej:  $a_\mu = 0.001165920705 \pm 0.000000000114$  (stat.)  $\pm 0.000000000091$  (syst.).
- Wynik wyraźnie potwierdza poprzednie pomiary z 2021 i 2023 oraz konsoliduje średnią światową.



# Implikacje i porównanie z przewidywanem MS

- **Najnowsza kompilacja Theory Initiative (WP25):**  
[arXiv:2505.21476](https://arxiv.org/abs/2505.21476)
- HVP  $e^+e^-$  (podejście data-driven) **nie** uwzględnione w WP25
  - pozostające napięcia wymagają wyjaśnienia
- WP25 (obliczenia oparte na siatkach QCD) **zgadzają się** z wynikiem eksperymentalnym
- Różnica między eksperymentem a SM zmniejszyła się do  $\Delta a_\mu = 38(63) \times 10^{-11} \approx 0.6\sigma$  – wcześniej był to około  $4\sigma$  z 2020.
- W efekcie: ograniczony obszar dla nowych modeli NP, np.  $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ : masa bozonu  $Z' \lesssim 300$  MeV .
- Eksperyment pozostaje kluczowym benchmarkiem – zbliżenie teorii do pomiaru nie implikuje wykluczenia NF, ale je zdecydowanie zawęża.
- zaawansowane przygotowana do możliwymy nowym eksperymentu w J-PARC lub CERN-ie  $\rightarrow$  intensywna wiązka mionów.

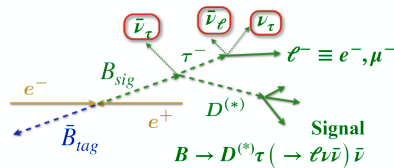


# Fizyka ciężkich zapachów - poszukiwanie BSM

- W rzadkich rozpadach i przejściach ze zmianą zapachu, tłumionych w Modelu Standardowym
  - Procesy z przejściem pętlowym (FCNC), amplitudy  $\propto V_{ts}, V_{td}$
  - Przykład:  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ,  $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$
- Duża czułość na wkłady nowej fizyki
  - supersymetria,  $Z'$ , leptoquarki, nowe fermiony
- Uniwersalność leptonowa (LFU) jako kluczowy test
  - obserwowane anomalie w  $R(K^{(*)})$ ,  $R(D^{(*)})$
- testy w układach  $K$ ,  $B$ ,  $D$ ,  $\tau$ 
  - fabryki B (Belle II), LHCb, NA62, KOTO

# Dlaczego środowisko $e^+e^-$ jest unikalne?

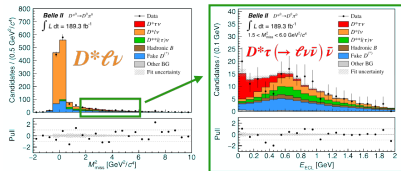
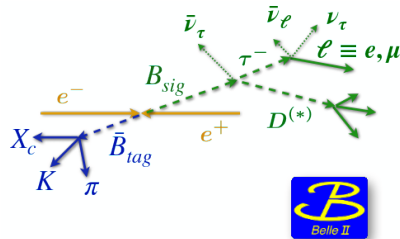
- niska krotność
- Pełna rekonstrukcja zdarzeń (hadronowe/pół-leptonowe znakowanie),
- Doskonała identyfikacja cząstek (identyfikacja leptonów, separacja  $\pi/K$ ),
- Bardzo dobra rozdzielczość wierzchołka i tracking,
- Specjalne triggerzy dla zdarzeń o niskiej krotności,
- Możliwość obserwacji kanałów z neutrinami i cząstkami długożyjącymi
- Detektor  $4\pi$ ,
- Więzy kinematyczny strony sygnałowej  $B_{\text{sig}}$  przez rekonstrukcję  $\bar{B}_{\text{tag}}$ .





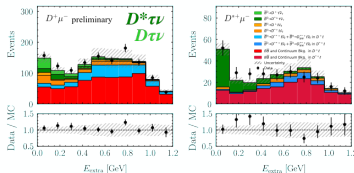
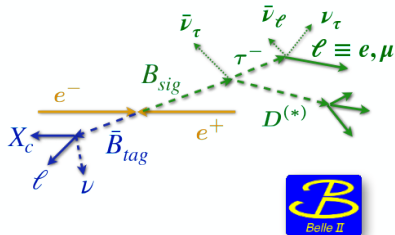
# LFU $b \rightarrow c\tau\nu$ , znakownie hadronowe Belle II

- Znakowanie hadronowe  $B_{tag}$  daje najlepszą kontrolę kinematyki  $B_{sig}$ 
  - Niska wydajność znakowania ( $\sim 0.1\%$ )
- Dopasowanie 2D do  $m_{miss}^2 = (p_B - p_{D^*} - p_\nu)^2$  oraz  $E_{ECL} \equiv E_{extra}$ 
  - $m_{miss}^2 \sim 0$  dla zdarzeń z jednym neutrinem, duże  $m_{miss}^2$  dla sygnału  $B \rightarrow D^{(*)}\tau(\rightarrow \ell\nu\nu)\nu$ ,
  - $E_{ECL}$ : energia w kalorymetrze niepowiązana z zrekonstruowanymi cząstkami, dla sygnału  $E_{ECL} \sim 0$
- $E_{ECL}$  trudny do modelowania (dominująca niepewność systematyczna)



LFU w  $b \rightarrow c\tau\nu$ , znakowanie pół-leptonowe Belle II

- Znakiowanie pól-leptonowe  $B_{tag}$  daje wyższą wydajność rekonstrukcji ( $\sim 1\%$ )
- dopasowanie w BDT(Boosted Decision Tree) (sygnał ( $z_\tau$ ), normalizację ( $z_\ell$ ), tło ( $z_{bkg}$ ))
  - $E_{extra}$  i  $\cos\theta_{BY}$  najbardziej czułe spośród 5 zmiennych wejściowych
  - $\cos\theta_{BY} = \frac{2E_{beam}E_Y - m_B^2 - m_Y^2}{2|\vec{p}_B||\vec{p}_Y|} \in [-1, 1]$  dla zdarzeń z jednym neutrinem, ujemne wartości dla sygnału
- Wynik BDT trudny do interpretacji, ale dystrybucje po dopasowaniu również pokazują dobrą zgodność



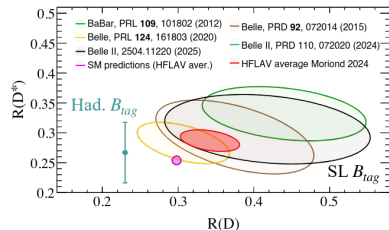
# Test uniwersalności leptonowej LFU w $b \rightarrow c\tau\nu$

$R(D^*)$

| heightRok | Eksperyment | Tag    | $\text{fb}^{-1}$ | Stat. | Syst. | Całk. [%] |
|-----------|-------------|--------|------------------|-------|-------|-----------|
| 2012      | BaBar       | Had.   | 426              | 7.1   | 5.6   | 9.0       |
| 2015      | Belle       | Had.   | 711              | 13.0  | 5.2   | 14.0      |
| 2015      | Belle       | Semil. | 711              | 6.4   | 4.9   | 8.1       |
| 2024      | Belle II    | Had.   | 189              | 15.3  | 13.0  | 20.0      |
| 2025      | Belle II    | Semil. | 365*             | 11.1  | 5.9   | 12.6      |

$R(D)$

| Rok  | Eksperyment | Tag    | $\text{fb}^{-1}$ | Stat. | Syst. | Całk. [%] |
|------|-------------|--------|------------------|-------|-------|-----------|
| 2012 | BaBar       | Had.   | 426              | 13.1  | 9.6   | 16.2      |
| 2015 | Belle       | Had.   | 711              | 17.1  | 7.1   | 18.5      |
| 2015 | Belle       | Semil. | 711              | 12.1  | 5.2   | 13.1      |
| 2025 | Belle II    | Semil. | 365*             | 17.7  | 12.2  | 21.5      |

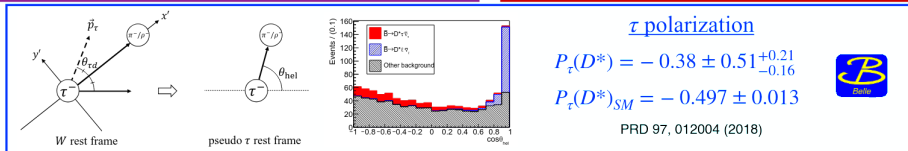
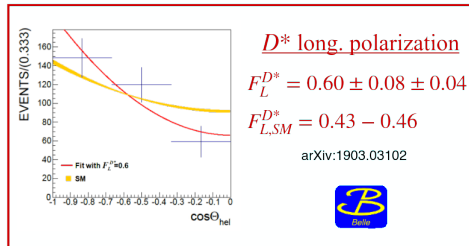
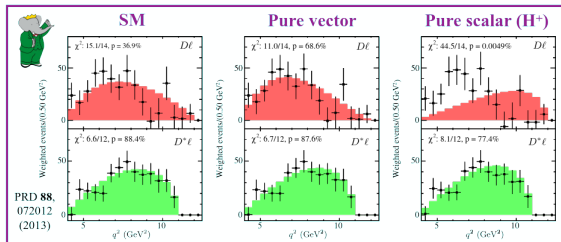


\*tylko neutralne mezony  $B \rightarrow \sim 50\%$  więcej dostępnych danych

- Największe systematyki: próbki MC i kształt  $E_{extra}$ ,
- Redukcja wraz z większymi próbkami danych/MC,
- Belle II ma potencjał poprawy dokładności względem BaBar i Belle,
- Wyniki zależą od modelu jaki był użyty w MC (MS w większości wypadków)  $\rightarrow$  do poprawy,
- **Nowe wyniki jeszcze we wrześniu z połączonych danych Belle i Belle II,**
- LHCb pokazało że jest w stanie mierzyć  $R(D^*)$  i  $R(D)$  bazując na ogromnym przekroju czynnym na produkcję  $b$ .

# Nowa fizyka w rozpadach $b \rightarrow c\tau\nu$

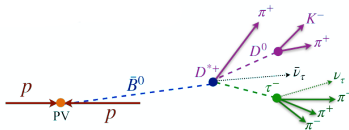
- NF w przejściach  $b \rightarrow c\tau\nu$  może się objawiać w rozkładach kinematycznych produktów rozpadu
  - próbkujemy bezpośrednio rozpad słaby/NF udająca rozpad słaby



# Pomiar polaryzacji podłużnej $D^*$ w LHCb

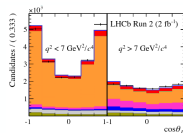
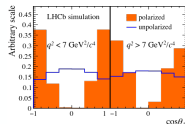
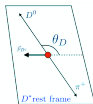
## Rekonstrukcja $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \nu$ :

- Dobre ograniczenia kinematyki.
- Niskie tło hadronowe.



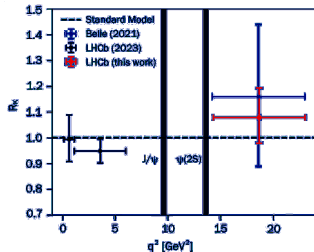
## Polaryzacja $D^*$ :

- Analiza rozkładu kąta  $\cos \theta_D$  w układzie spoczynkowym  $D^*$ .
- Porównanie rozkładów dla  $q^2 < 7 \text{ GeV}^2/c^4$  i  $q^2 > 7 \text{ GeV}^2/c^4$ .
- Wykorzystano dane Run 2 (2 fb<sup>-1</sup>).



## $R_K$ i $R_{K^*}$ (LHCb)

- Wyniki zgodne z SM w przedziałach low/central- $q^2$  (patrz rysunek).
- Globalne dopasowania współczynników Wilsona nie wymagają już dużych odstępstw od SM.



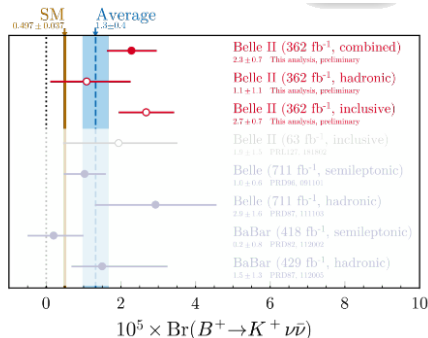
$$B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$$

- $3.5\sigma$  od hipotezy że mamy tylko tło,
- $2.7\sigma$  od hipotezy MS
- Belle II pokazało pierwszą ewidencję rozpadu  $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$  używając inkluzywnej i ekskluzywnej rekonstrukcji B znakującego (PRD 109,112006(2024))

$$(2.3 \pm 0.7) \times 10^{-5} \text{ (combined)}$$

$$(1.1^{+1.2}_{-1.0}) \times 10^{-5} \text{ (hadronic)}$$

$$(2.7 \pm 0.7) \times 10^{-5} \text{ (inclusive)}$$



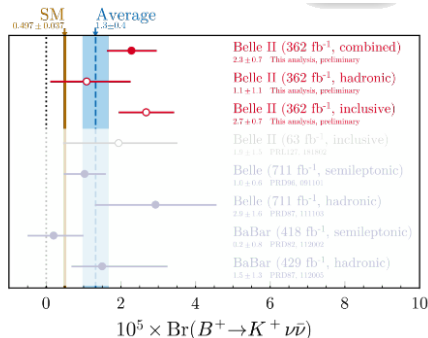
$$B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$$

- $3.5\sigma$  od hipotezy że mamy tylko tło,
- $2.7\sigma$  od hipotezy MS
- Belle II pokazało pierwszą ewidencję rozpadu  $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$  używając inkluzywnej i ekskluzywnej rekonstrukcji B znakującego (PRD 109,112006(2024))
- Możliwość reinterpretacji wyników (także przez grupy zewnętrzne została zaimplementowana każdy może swój ulubiony model przetestować

$(2.3 \pm 0.7) \times 10^{-5}$  (combined)

$(1.1^{+1.2}_{-1.0}) \times 10^{-5}$  (hadronic)

$(2.7 \pm 0.7) \times 10^{-5}$  (inclusive)





# Rozpad $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

## Model Standardowy:

$$\text{BR}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) \approx 3.65 \times 10^{-9}.$$

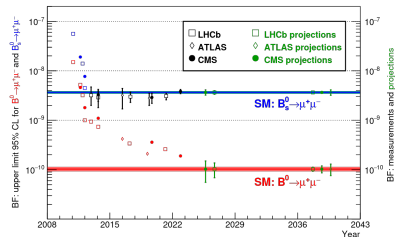
## Uśrednienie (ATLAS+CMS+LHCb, 2025):

$$\text{BR}_{\text{exp}} = (3.52_{-0.30}^{+0.32}) \times 10^{-9}$$

zgodny z MS w granicach niepewności.

## Znaczenie:

- Najczulszy test przejść FCNC.
- Ogranicza nowe modele (SUSY,  $Z'$ ).



Źródło: LHCb+CMS kombinacja (EPJC 2023).

# Zachowania zapachu leptonów w rozpadach $\tau$

- Test Modelu Standardowego (SM) Uniwersalność leptonowa (LFU):

$$g_e = g_\mu = g_\tau$$

- Pomiar  $R_\mu$  w Belle II:  $R_\mu = \frac{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau)}{\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} \Big|_{\text{SM}} = 0.9726$

Najdokładniejszy pojedynczy pomiar w rozpadach  $\tau$ .

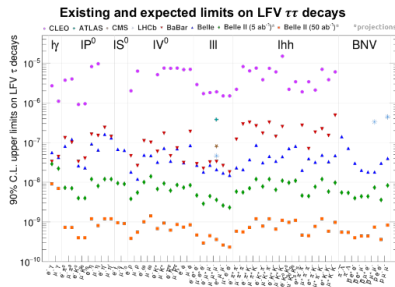
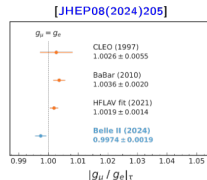
- Bezpośrednie poszukiwania nowej fizyki:

- Naruszenie liczby leptonowej (LFV) oczekiwane w SM na poziomie  $10^{-55} \rightarrow$  poza obecną czułością.
- W wielu modelach (np.  $Z'$ , naładowany bozon Higgsa) wzrost częstości aż do  $10^{-10}$ – $10^{-8}$ .
- Każda obserwacja  $\rightarrow$  jednoznaczny sygnał nowej fizyki.

- Belle II już ustawia limity światowej klasy:

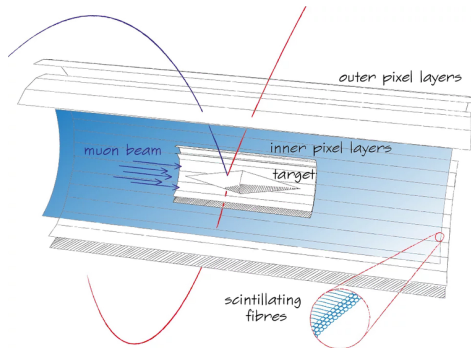
- $\tau \rightarrow 3\mu$ : najbardziej dostępny eksperymentalnie [JHEP09(2024)062]
- $\tau \rightarrow \Lambda(\bar{\Lambda})\pi$ : naruszenie liczby barionowej  $\rightarrow$  warunek asymetrii materia/antymateria [PRD 110, 112003]
- $\tau \rightarrow \ell\alpha$ : kandydat na nowy bozon ciemnej materii [PRD 107, 072002]

- Oczekuje się, że Belle II poprawi obecne limity przynajmniej o rząd wielkości.
- High Lumi LHCb powinno potwierdzić a być może nawet przekroczyć ograniczenia fabryk B



## CLFV: stan i perspektywy

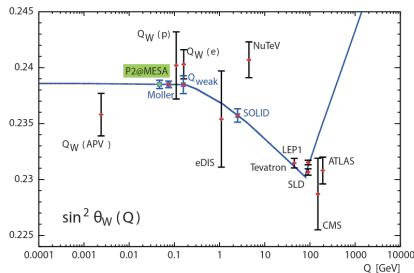
- MEG II (2025):  $\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 1.5 \times 10^{-13}$  (90% C.L.).
- Mu3e: Faza I  $\sim 2 \times 10^{-15}$ , Faza II  $\sim 10^{-16}$  (docelowe).
- Mu2e: czułość  $R_{\mu e} \sim (6-8) \times 10^{-17}$ .
- Belle II oczekiwana czułość dla  $50 \text{ ab}^{-1}$ :  $\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu \gamma) \sim 1 \times 10^{-9}$ ,  $\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu \mu \mu) \sim 1 \times 10^{-10}$ .



# Łamanie parzystości i pomiar kąta mieszania słabego przy niskim $Q^2$

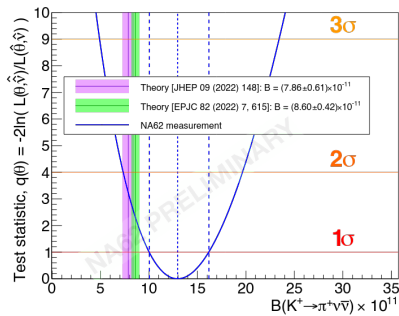
Eksperymenty te precyzyjnie mierzą słaby ładunek protonów i innych jąder, który jest bezpośrednio związany z kątem mieszania słabego. Odchylenie przy małym  $Q^2$  podważyłoby przewidywania MS dotyczące „przebiegu” słabego kąta mieszania i mogłoby być sygnałem nowej fizyki, takiej jak ciemny bozon Z.

- **Qweak (proton), MOLLER (JLab), P2 (MESA):**  
precyzyjny pomiar  $\sin^2 \theta_W$  przy niskim przekazie pędu.
  - **Qweak (JLab):**  $Q_W^p$ , zgodność z SM, niepewność  $\sim 0.3\%$
  - **SLAC E158 (Møller):**  
 $\sin^2 \theta_W^{eff} = 0.2397 \pm 0.0010_{\text{stat}} \pm 0.0008_{\text{syst}}$  przy  $Q^2 = 0.026 \text{ GeV}^2$
  - **P2 (MESA):** planowana precyzja  $\sim 0.13\%$ ,  $Q^2 \approx 4.5 \times 10^{-3} \text{ GeV}^2$
- Atomowe łamanie parzystości (Cs, Yb): badanie sprzężeń  $e-q$ . Neutralny prąd słaby ( $Z^0$ ) miesza stany o przeciwnej parzystości  $\Rightarrow$  bardzo mała asymetria w przejściach optycznych.



## $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ (NA62 2024) i $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ (KOTO)

- NA62 (2024):  $\mathcal{B}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (13.0_{-3.0}^{+3.3}) \times 10^{-11}$  (pierwsza obserwacja  $> 5\sigma$ ).
- Prognoza SM:  $(7.7\text{--}8.4) \times 10^{-11}$ . KOTO: obecnie limity dla  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  na poziomie  $10^{-9}$ ; cel KOTO-II:  $\lesssim 10^{-12}$ .



# Poszukiwanie “ciemnego” sektora w Belle II, przykład

- Badanie “nie nieminimalnego modelu ciemnego” sektora (DS)

przewidującego 4 nowe cząstki

- ciemny foton  $A'$ , ciemny Higgs  $h'$
- dwa stany ciemnej materii  $\chi_1, \chi_2$

- 7 wolnych parametrów: 3 masy, 2 kąty mieszania, 2 sprzężenia

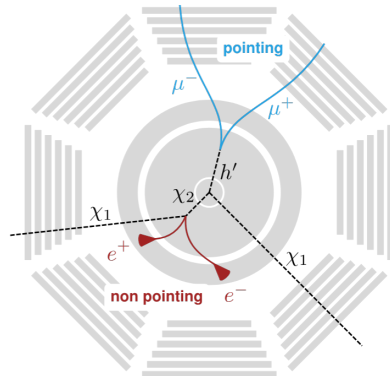
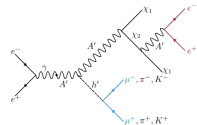
- Poszukiwanie jednoczesnej produkcji  $A'$  i  $h'$

- 4 ślady w stanie końcowym:

- 2 tworzące odsunięty wierzchołek celujący w punkt interakcji
- 2 tworzące odsunięty wierzchołek nie celujący
- brakująca energia

- Wyzwanie dla systemów trackingu i wyzwalania,

- Analiza 3 stanów końcowych:  $h' \rightarrow x^+ x^-$ , gdzie  $x = \mu, \pi, K$



# Sektor ciemny w eksperymentach typu fixed-target i beam-dump

## Motywacja:

- Eksperymenty intensywności mogą badać nowe lekkie cząstki ( $m \lesssim \text{GeV}$ ), niedostępne dla zderzaczy wysokiej energii.
- Szczególna czułość na **ciemne fotony** i aksjony (ALP).

## Eksperymenty:

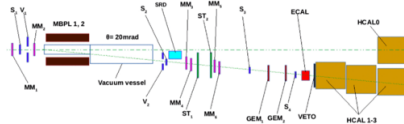
- NA64, HPS, APEX, PADME – poszukiwania widocznych i niewidocznych kanałów ciemnych fotonów / ALP.
- LDMX (proponowany) – precyzyjne pomiary brakującej energii w rozpraszaniu wiązki elektronowej.

## Bezpośrednia detekcja (sub-GeV):

- SENSEI, DAMIC-M, SuperCDMS HV – eksperymenty z niskim progiem energii, czułe na lekką DM.

## Kosmologia i astrofizyka:

- Ograniczenia komplementarne:  $N_{\text{eff}}$ , chłodzenie gwiazd, nukleosynteza BBN.



Schemat eksperymentu NA64: elektron zderza się z tarczą → produkcja i ucieczka ciemnego fotonu.

# Test unitarności macierzy CKM (pierwszy rząd macierzy (C)KM)

- **Macierz CKM** opisuje mieszanie zapachów kwarków  $u, d, s, c, b, t$ .
- Dla pierwszego rzędu unitarność wymaga:

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 1$$

- **Elementy:**
  - $V_{ud}$ : wyznaczany z superdozwolonych przejść  $\beta$  ( $0^+ \rightarrow 0^+$ ), z rozpadów neutronu i pionu.
  - $V_{us}$ : wyznaczany z rozpadów kaonów (leptonowych i pół leptonowych), wspierany przez obliczenia na sieci QCD.
  - $V_{ub}$ : bardzo mały ( $\sim 0.004$ ), pomijalny w bilansie.
- **Znaczenie:** Testy unitarności są czułe na nową fizykę w skali TeV, np. dodatkowe bozony  $W'$ , leptokwarki czy sprzężenia nieuniwersalne.



# Test unitarności – aktualne wyniki

## Światowe średnie (2024):

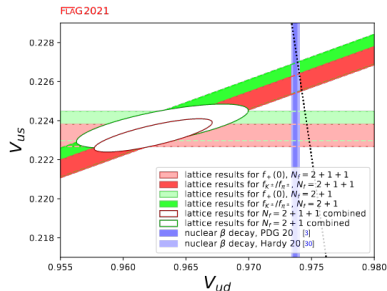
- $|V_{ud}| = 0.97370 \pm 0.00014$  (superdozwolone rozpady  $\beta$ )
- $|V_{us}| = 0.2243 \pm 0.0005$  (rozpady  $K_{\ell 3}$ ,  $K_{\mu 2}$  + lattice QCD)
- $|V_{ub}| \approx 0.00394 \pm 0.00036$

## Suma:

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0005$$

→ Odchylenie  $\sim 3\sigma$  od unitarności.

**Interpretacja:** Możliwe wskazanie na nową fizykę → np. interakcje wektorowe poza SM, nieuniwersalne sprzężenia lepton–kwarkowe.



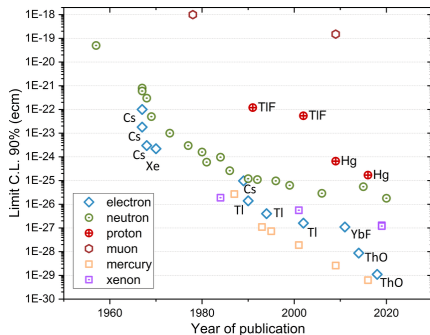
Wykres:  $|V_{ud}|$ – $|V_{us}|$  z pomiarów + unitarność (linia 1). Źródło: Flavour Lattice Averaging Group (FLAG, 2024), PDG 2024.

# Elektryczne momenty dipolowe (EDM)

- EDM są bezpośrednim testem nowych faz CP.
  - W Modelu Standardowym wartości są ekstremalnie małe ( $< 10^{-31}$ – $10^{-32}$  e·cm).
  - Każde wykrycie sygnału w aktualnych eksperymentach oznacza nową fizykę.
- **Neutron EDM:** Eksperymenty z ultrazimnymi neutronami (UCN) — n2EDM (PSI), TUCAN (TRIUMF). Dłuższy czas przechowywania i dokładna magnetometria  $\rightarrow$  czułość  $\sim 10^{-27}$  e·cm.
- **Elektronowe / atomowe EDM:** Molekuły ThO, HfF<sup>+</sup>, ciężkie atomy (<sup>199</sup>Hg, <sup>225</sup>Ra). Silne wewnętrzne pola elektryczne wzmacniają efekty CP-nieparzyste.
- **Znaczenie:**
  - Test baryogenezy: czy nowe źródła łamania CP mogą tłumaczyć asymetrię materia–antymateria?
  - Ograniczenia na szeroką klasę scenariuszy BSM (supersymetria, modele z  $Z'$ , leptokwarki).

## Granice na EDM: elektron, neutron, atomy

- Elektron:  $|d_e| < 4.1 \times 10^{-30} \text{ e} \cdot \text{cm}$  (90% C.L., JILA 2023).
- Neutron:  $|d_n| < 1.8 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$  (PSI nEDM 2020).
- $^{199}\text{Hg}$ :  $|d_{\text{Hg}}| < 7.4 \times 10^{-30} \text{ e} \cdot \text{cm}$  (2016).
- **Znaczenie:** EDM łamie symetrie  $P$  i  $T$  ( $\rightarrow CP$ ), więc nowe niezerowe wartości wskazywałyby na nową fizykę (BSM).



# Podsumowanie

- Precyzyjne testy niskoenergetyczne (w tym *fizyka zapachów*) są kluczowe: odkrycie subtelnych odchyleń albo silne ograniczenia modeli BSM,
- stan 2025:  $(g - 2)_\mu$  i  $b \rightarrow s\ell\ell$  zgodne z SM; napięcia w  $R(D^{(*)})$ ; szybkie postępy w  $K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$ , EDM i CLFV,
- następne lata rozstrzygną wiele z tych kwestii dzięki Belle II, LHCb Upgrade II, NA62/KOTO-II, MEG II/Mu3e/Mu2e i eksperymentom EDM,
- ze względu na ograniczenia czasowe nie pokryłem całego sektora testów (C)KM które są prowadzone w LHCb i Belle II.

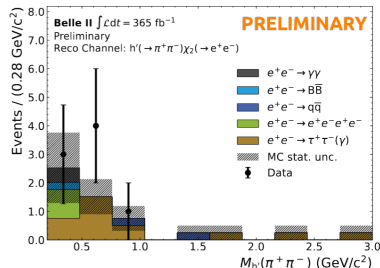
# Backup

## Założenia i zakres

- Terminologia używana w tej prezentacji: **fizyka zapachów** (ang. *flavor physics*).
- Trzy filary: (1)  $a_\mu = (g - 2)_\mu$ , (2) precyzyjna fizyka zapachów ( $B$ ,  $K$ ), (3) CPV, EDM i złamanie zapachu w sektorze leptonowym (CLFV).
- Stan liczb (2024–2025): włączone w slajdach merytorycznych; szczegóły w podpisach i na slajdach z rysunkami.

# Wyniki poszukiwań $h' \rightarrow x^+ x^-$ w Belle II

- Selekcja sygnału
  - wymagania na kąty pointing oraz odległość wierzchołka od punktu interakcji
  - bardzo małe tło ze SM
- Liczba sygnału
  - strategia cut-and-count w rozkładach  $M_{h'}(x^+ x^-)$
  - tło szacowane z sidebandów w danych
  - analiza nie opiera się na symulacjach MC
- Brak istotnego nadmiaru
  - zaobserwowano 9 przypadków (8 z nich to  $\pi^+ \pi^-$ ) — zgodnie z oczekiwanym tłem
  - analiza na podstawie  $365 \text{ fb}^{-1}$  danych Belle II — ograniczona statystyką
  - oczekiwane ograniczenia:  $\sim 10^{-1} \text{ fb}$ , kąt mieszania  $\sim 10^{-5}$ .



## Perspektywy

- EDMs (n2EDM, TUCAN), Mion CLFV (MEG II, Mu3e, COMET/Mu2e), kaony ( $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ ), łamanie parzystości (MOLLER, P2), ciemny sektor (NA64, HPS/APEX, DAMIC-M/SENSEI, SuperCDMS), rozpad protonu(Hyper-K).
- Globalne dopasowanie pozwoli na koherentny obraz całego sektora.



## Belle II (B factory at SuperKEKB)

- $e^+e^-$  near  $\Upsilon(4S)$  (10.58 GeV); clean initial state.
- FEI, excellent vertexing/PID, hermeticity  $\Rightarrow$  czułość to missing energy channels.
- Rare/forbidden:  $b \rightarrow s\ell\ell$ ,  $b \rightarrow s\gamma$ ,  $B \rightarrow K^{(*)}\nu\bar{\nu}$ ; LU tests;  $\tau$  LFV; charm CPV/mixing.