

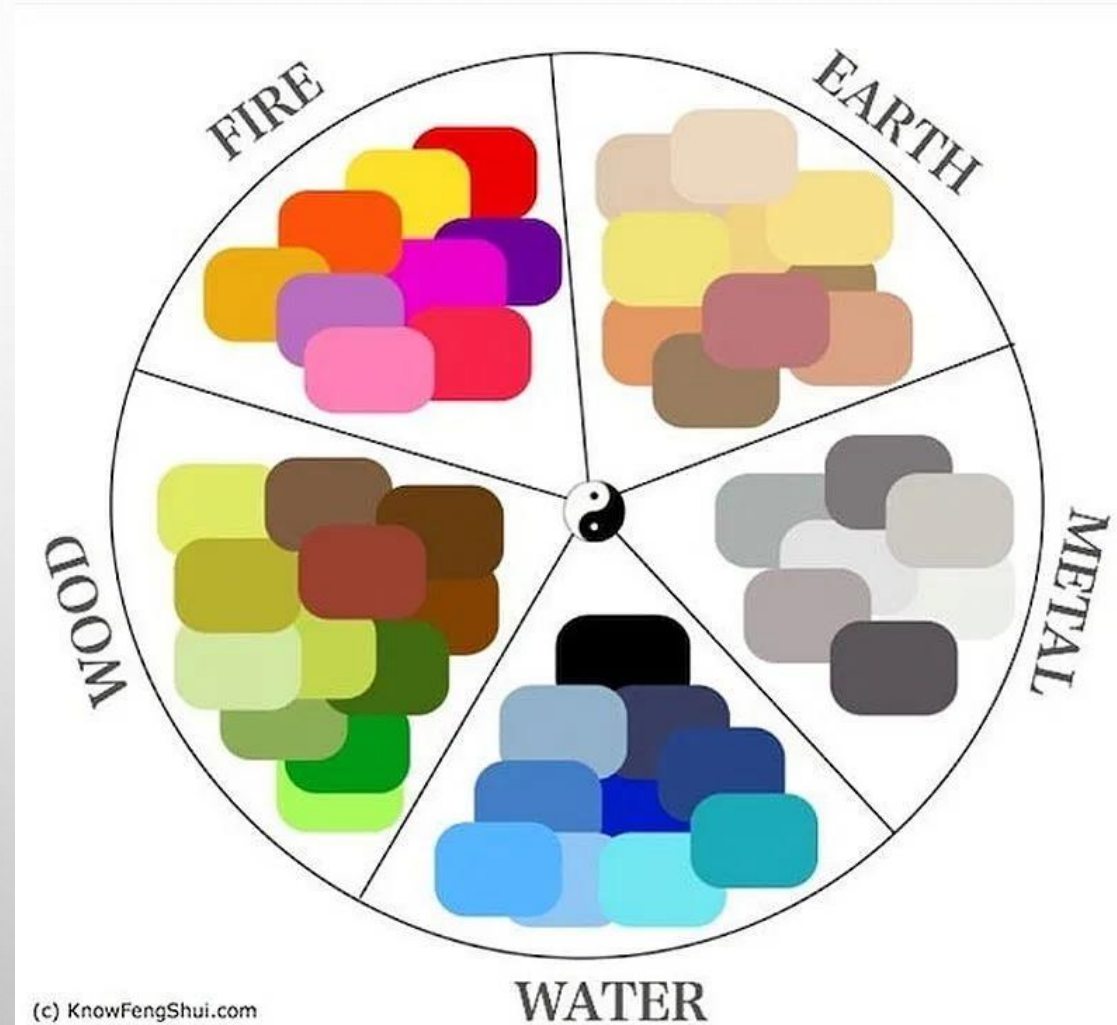
TOMASZ SZUMLAK

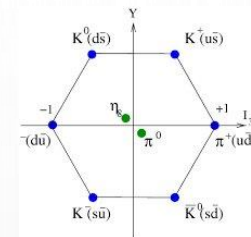
AGH-UST

ZEPSUTE ZWIERCIADŁO KOSMOSU

26/11/2021, KRAKÓW, SEMINARIUM WYDZIAŁU FIZYKI I INFORMATYKI
STOSOWANEJ AGH

MODEL STANDARDOWY V0.1





MODEL STANDARDOWY V1.0

UKŁAD OKRESOWY PIERWIASTKÓW

1

1.008

2.2

H

Wodór

Hydrogenium

2

4.0026

3.8

He

Hel

Helium

3

6.938

0.98

Li

Lit

Lithium

4

9.012

1.57

Be

Beryl

Beryllium

11

22.99

0.93

Na

Sód

Natrium

12

24.305

1.3

Mg

Magnez

Magnesium

19

39.098

0.82

K

Potas

Kalium

20

40.078

1.0

Ca

Wapń

Calcium

27

58.933

1.91

Co

Kobalt

Cobaltum

28

58.693

1.90

Ni

Nikiel

Niccolum

35

79.904

2.96

Br

Brom

Bromium

36

83.798

3.00

Kr

Krypton

Krypton

43

97.91

1.9

Tc

Technet

Technetium

44

101.07

2.2

Ru

Ruten

Ruthenium

51

121.76

2.05

Sb

Antymon

Stibium

52

127.60

2.1

Te

Tellur

Tellurium

59

140.91

1.13

Pr

Prazeodym

Praseodymium

60

144.24

1.14

Nd

Neodym

Neodymium

67

164.93

1.23

Dy

Dyspro

Dysprosium

68

167.26

1.24

Ho

Erb

Erbium

75

186.93

1.36

Re

Ren

Rhenium

76

187.03

1.37

Os

Osm

Osmium

83

208.98

1.62

Pb

Ołów

Plumbum

84

209

1.63

Bi

Bismut

Bismutium

91

231.04

1.5

Pa

Protaktyn

Protactinium

92

238.03

1.36

U

Uran

Uranium

99

249

1.3

Es

Einstein

Einsteinium

100

252

1.3

Fm

Fermi

Fermium

107

268

1.3

Bh

Bohr

Bohrium

108

269

1.3

Hs

Has

Hassium

115

289

1.3

Mc

Moscovium

Moscovium

116

293

1.3

Lv

Lwermor

Livermorium

123

302

1.3

Nh

Nihonium

Nihonium

124

304

1.3

Fl

Flerow

Flerovium

131

315

1.3

Uu

Ununpentium

Ununpentium

132

317

1.3

Uub

Ununseptium

Ununseptium

139

349

1.3

Uuh

Ununheptium

Ununheptium

140

351

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

147

362

1.3

Uus

Ununseptium

Ununseptium

148

364

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

153

373

1.3

Uut

Ununtrium

Ununtrium

154

375

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

161

384

1.3

Uuh

Ununheptium

Ununheptium

162

386

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

169

395

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

170

397

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

177

404

1.3

Uuh

Ununheptium

Ununheptium

178

406

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

185

413

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

186

415

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

193

421

1.3

Uuh

Ununheptium

Ununheptium

194

423

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

201

431

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

202

433

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

209

439

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

210

441

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

217

448

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

218

450

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

225

457

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

226

459

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

232

465

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

233

467

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

241

475

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

242

477

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

249

483

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

250

485

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

257

491

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

258

493

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

265

499

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

266

501

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

273

507

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

274

509

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

281

515

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

282

517

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

289

523

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

290

525

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

297

531

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

298

533

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

305

539

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

306

541

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

313

547

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

314

549

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

321

555

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

322

557

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

329

563

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

330

565

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

337

569

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

338

571

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

345

575

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

346

577

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

353

581

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

354

583

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

361

587

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

362

589

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

369

593

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

370

595

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

377

599

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

378

601

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

385

603

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

386

605

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

393

607

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

394

609

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

401

613

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

402

615

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

409

617

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

410

619

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

417

621

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

418

623

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

425

625

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

426

627

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

432

629

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

433

631

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

439

633

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

440

635

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

447

637

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

448

639

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

455

641

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

456

643

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

462

645

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

463

647

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

469

649

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

470

651

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

477

653

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

478

655

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

484

657

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

485

659

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

491

661

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

492

663

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

498

665

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

499

667

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

506

669

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

507

671

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

513

673

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

514

675

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

520

677

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

521

679

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

527

681

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

528

683

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

534

685

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

535

687

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

541

689

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

542

691

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

548

693

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

549

695

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

555

697

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

556

699

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

562

701

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

563

703

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

569

705

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

570

707

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

576

709

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

577

711

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

583

713

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

584

715

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

590

717

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

591

719

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

596

721

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

597

723

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

603

725

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

604

727

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

609

729

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

610

731

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

616

733

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

617

735

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

623

737

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

624

739

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

629

741

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

630

743

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

636

745

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

637

747

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

643

749

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

644

751

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

649

753

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

650

755

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

656

757

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

657

759

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

663

761

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

664

763

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

669

765

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

670

767

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

676

769

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

677

771

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

683

773

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

684

775

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

689

777

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

690

779

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

696

781

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

697

783

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

703

785

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

704

787

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

709

789

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

710

791

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

716

793

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

717

795

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

723

797

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

724

799

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

729

801

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

730

803

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

736

805

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

737

807

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

743

809

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

744

811

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

749

813

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

750

815

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

756

817

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

757

819

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

763

821

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

764

823

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

769

825

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

770

827

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

776

829

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

777

831

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

783

833

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

784

835

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

789

837

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

790

839

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

796

841

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

797

843

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

803

845

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

804

847

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

809

849

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

810

851

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

816

853

1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

817

855

1.3

Uuq

Ununquadium

Ununquadium

823

857

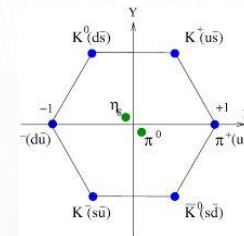
1.3

Uuo

Ununoctium

Ununoctium

824</



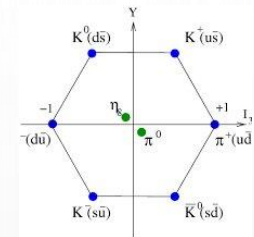
MODEL STANDARDOWY V2.0

Standard Model of Elementary Particles

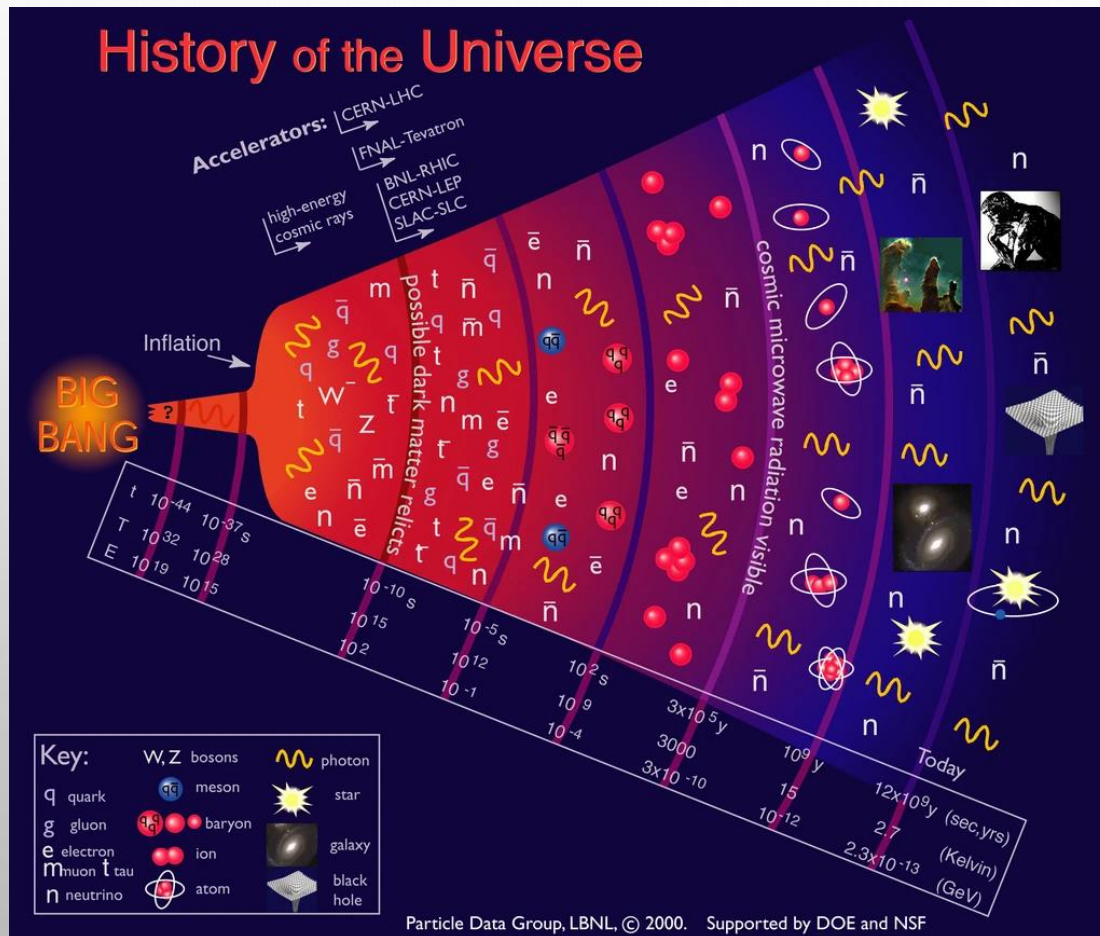
	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
				± 1	
				1	

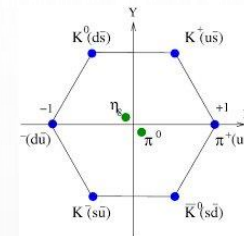
SCALAR BOSONS

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS



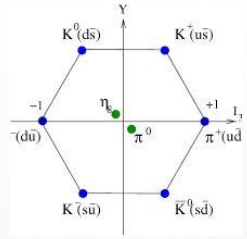
TAJEMNICA WSZECHŚWIATA...





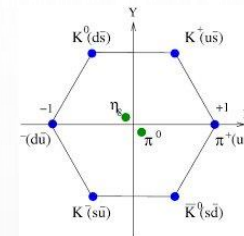
CIEKAWOSKA!

- ❑ BLISKIE ZWIĄZKI FIZYKI CZĄSTEK ELEMENTARNYCH Z KOSMOLOGIĄ
- ❑ HISTORIA WSZECHŚWIATA $kT = N_{q,i}(nq, nl) \frac{1 \cdot MeV}{\sqrt{t}}$, T JEST CZASEM EKSPANSJI A FUNKCJA $N_{q,i}$ ZALEŻY OD LICZBY KWARKÓW I LEPTONÓW
 - ❑ DLA $kT \approx 10^6 [MeV] \rightarrow t \approx 10^{-12} [s]$, WARUNKI PANUJĄCE W LHC PODCZAS ZDERZEŃ PROTONÓW PODOBNE DO TYCH JAKIE PANOWAŁY TUŻ PO WIELKIM WYBUCHU
- ❑ STOSUNEK MASY HELU DO MASY WODORU OBSERWOWANY WE WSZECHŚWIECIE ZALEŻY OD LICZBY LEPTONÓW W MS
- ❑ **TO JEST NIEZWYKŁE!**



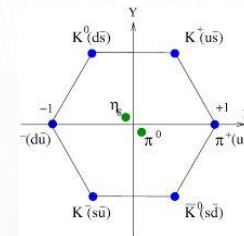
DŁUGA DROGA PRZED NAMI...

- ❑ POWTARZALNOŚĆ STRUKTURY MS , DLACZEGO MASA ISTNIEJE I DLACZEGO TAKIE RÓŻNE WARTOŚCI?
- ❑ MS POTRZEBUJE TAK WIELU WOLNYCH PARAMETRÓW? (MASY, STAŁE SPRZĘŻENIA,...)
- ❑ PROBLEM HIERARCHII ODDZIAŁYWAŃ – SKALA ODDZIAŁYWAŃ SŁABYCH ZNACZNIE PONIŻEJ SKALI PLANCKA
- ❑ ŹRÓDŁO DUŻEGO ŁAMANIA SYMETRII POMIĘDZY MATERIAŁ I ANTY-MATERIAŁ JEST NIEZNANE!
- ❑ NATURA CIEMNEJ MATERII DOMINUJĄCEJ MASY GALAKTYK (PRĘDKOŚĆ OBROTOWA)?
- ❑ NATURA CIEMNEJ ENERGII POWODUJĄCEJ PRZYSPIESZANIE EKSPANSJI WSZECHŚWIATA?
- ❑ GRAWITACJA...?



SYMETRIE I PRAWA ZACHOWANIA

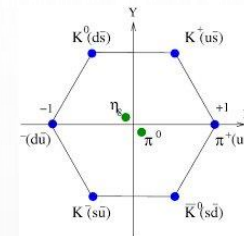
- ❑ JEDNA Z BARDZO CIEKAWYCH WŁASNOŚCI UKŁADÓW FIZYCZNYCH, KTÓRE PODLEGAJĄ EWOLUCJI W FUNKCJI CZASU: NIEKTÓRE WŁASNOŚCI TYCH UKŁADÓW **ZOSTAJĄ ZACHOWANE**
- ❑ UNIWERSALNOŚĆ TAKIEGO ZACHOWANIA SPRAWIA, ŻE TRAKTUJEMY JE JAKO PRAWA FIZYKI
- ❑ CO CIEKAWE – NIEKTÓRE Z TYCH ZASAD ZACHOWANIA SĄ DOKŁADNE, INNE TYLKO PRZYBLIŻONE
- ❑ CO WIĘCEJ, ZASADY ZACHOWANIA SĄ ZWIĄZANE Z ISTNIENIEM OPERACJI SYMETRII, WZGLĘDEM KTÓRYCH UKŁAD FIZYCZNY POZOSTAJE NIEZMIENNICZY
- ❑ NP. SYMETRIE ZWIĄZANE Z OPERACJAMI CZASO-PRZESTRZENNYMI (OBROTY, TRANSLACJE) PROWADZĄ DO ZACHOWANIA PĘDU, ENERGII, MOMENTU PĘDU



SYMETRIE I PRAWA ZACHOWANIA

- ❑ ZASADY PRZYBLIŻONE, TO NA PRZYKŁAD, SYMETRIA WZGLĘDEM INWERSJI PRZESTRZENNEJ (PARZYSTOŚĆ PRZESTRZENNA)
- ❑ ISTNIENIE ZWIĄZKU POMIĘDZY SYMETRIAMI UKŁADU FIZYCZNEGO (NIEZMIENNICZOŚĆ) A ZASADAMI ZACHOWANIA NIE JEST TRYWIALNYM FAKTEM
- ❑ **TWIERDZENIE NOETHER JEST JEDNYM Z NAJWIĘKSZYCH ODKRYĆ FIZYKI, TWIERDZENIE TO MÓWI, ŻE DLA KAŻDEJ TZW. CIĄGŁEJ GRUPY SYMETRII (SYMETRIA RÓŻNICZKOWALNA, LIE) LAGRANŻJANU OPISUJĄCEGO WŁASNOŚCI UKŁADU FIZYCZNEGO ISTNIEJE ZWIĄZANA Z TĄ SYMETRIĄ ZASADA ZACHOWANIA** W MODELU STANDARDOWYM CENTRALNE MIEJSCE ZAJMUJĄ **SYMETRIE UNITARNE**

$SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$



OBRAZ SIĘ KOMPLIKUJE JEŚLI „WŁĄCZYMYS” ODDZIAŁYWANIA...

- Lewoskrętne dublety kwarkowe :

$$Q_{Li}^I(3, 2, 1/6) = \begin{pmatrix} u_r^I & u_g^I & u_b^I \\ d_r^I & d_g^I & d_b^I \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c_r^I & c_g^I & c_b^I \\ s_r^I & s_g^I & s_b^I \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t_r^I & t_g^I & t_b^I \\ b_r^I & b_g^I & b_b^I \end{pmatrix}_L \quad \begin{matrix} T_3 = +1/2 \\ T_3 = -1/2 \end{matrix} \quad (Y = 1/6)$$

$$Q = T_3 + Y$$

- Singlety kwarkowe

$$u_{Ri}^I(3, 1, 2/3) = (u_r^I, u_g^I, u_b^I)_R, (c_r^I, c_g^I, c_b^I)_R, (t_r^I, t_g^I, t_b^I)_R \quad (Y = 2/3)$$

$$d_{Ri}^I(3, 1, -1/3) = (d_r^I, d_g^I, d_b^I)_R, (s_r^I, s_g^I, s_b^I)_R, (b_r^I, b_g^I, b_b^I)_R \quad (Y = -1/3)$$

- Lewoskrętne dublety leptonowe:

$$L_{Li}^I(1, 2, -1/2) = \begin{pmatrix} \nu_e^I \\ e^I \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu^I \\ \mu^I \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau^I \\ \tau^I \end{pmatrix}_L \quad \begin{matrix} T_3 = +1/2 \\ T_3 = -1/2 \end{matrix} \quad (Y = -1/2)$$

- Naładowane singlety leptonowe

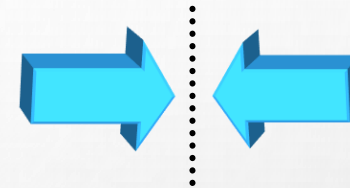
$$l_{Ri}^I(1, 1, -1) = e_R^I, \mu_R^I, \tau_R^I \quad (Y = -1)$$

SYMETRIE DYSKRETNE

Parzystość przestrzenna, P :

nieobserwowalna zmienna: **absolutna skrętność**

- Odbicie układu współrzędnych względem początku.
Zmiana prawo- na lewo-skrętne.
- $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$, $\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$ (wektory) but $\vec{L} = \vec{x} \times \vec{p}$ (pseudo-wektory)



Parzystość ładunkowa, C :

nieobserwowalna zmienna : **absolutny ładunek**

- Zmiana znaku addytywnych liczb kwantowych.
- $e^+ \rightarrow e^-$, $K^- \rightarrow K^+$



Parzystość czasu, T :

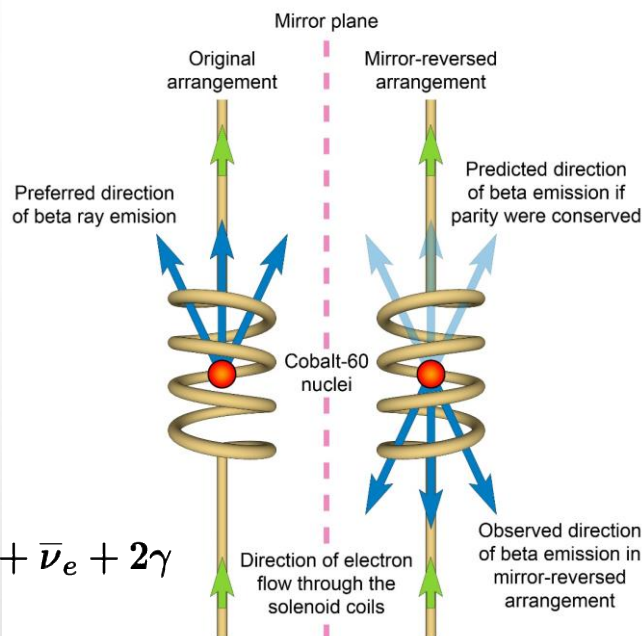
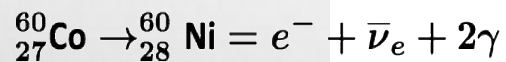
nieobserwowalna zmienna : **strzałka czasu**

- Changes direction of motion of particles
- $t \rightarrow -t$



Teorem CPT:

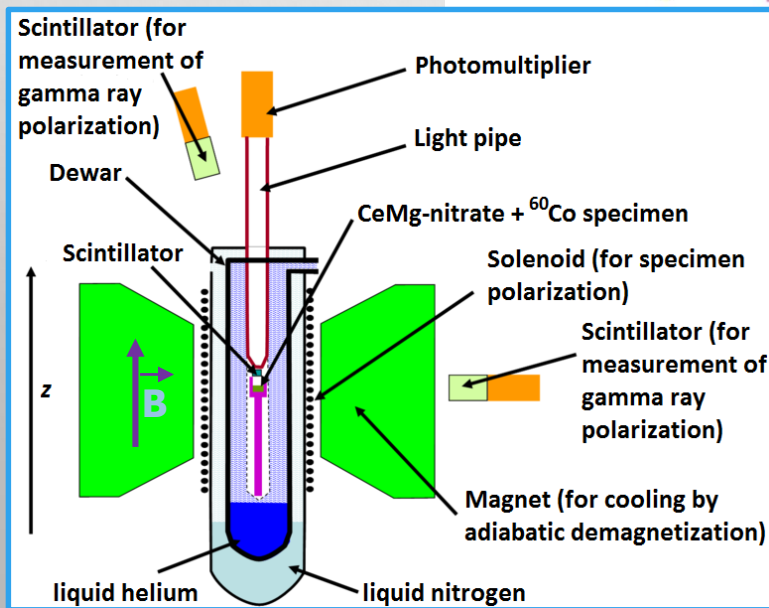
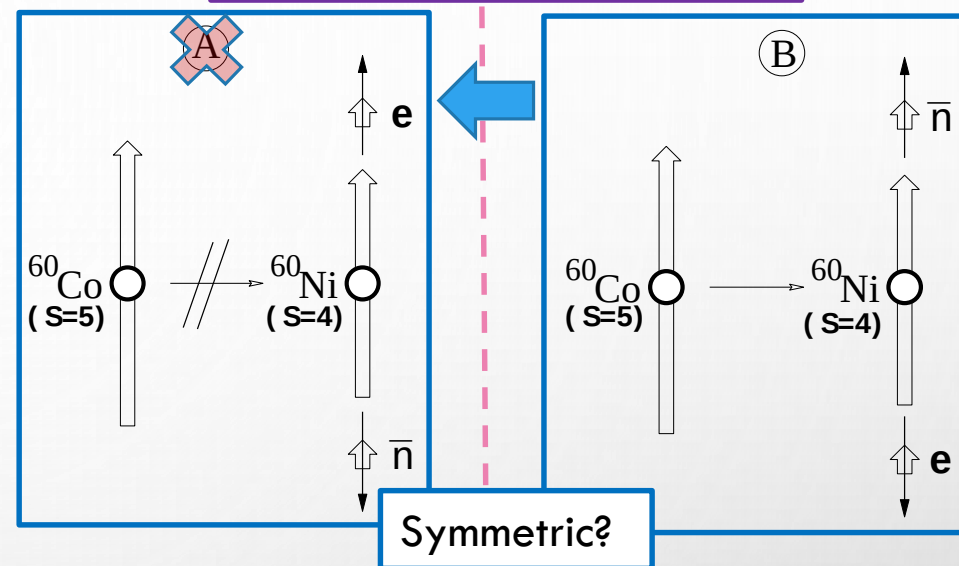
- Wszystkie oddziaływania muszą być niezmiennicze względem operacji C , P oraz T
- Cząstka jest swoją antycząstką poruszającą się do tyłu w czasie
- **Musimy obserwować te same masy i czasy życia dla cząstek i antycząstek**



Pole B

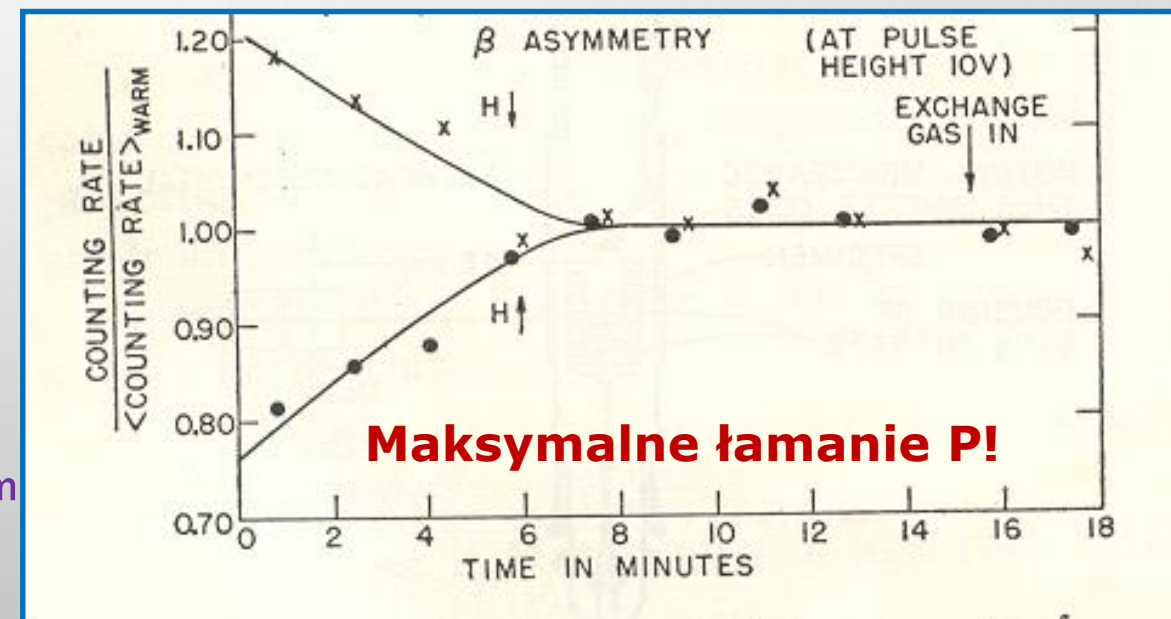
Spin jest pseudowektorem, P: $\vec{S} \rightarrow \vec{S}$

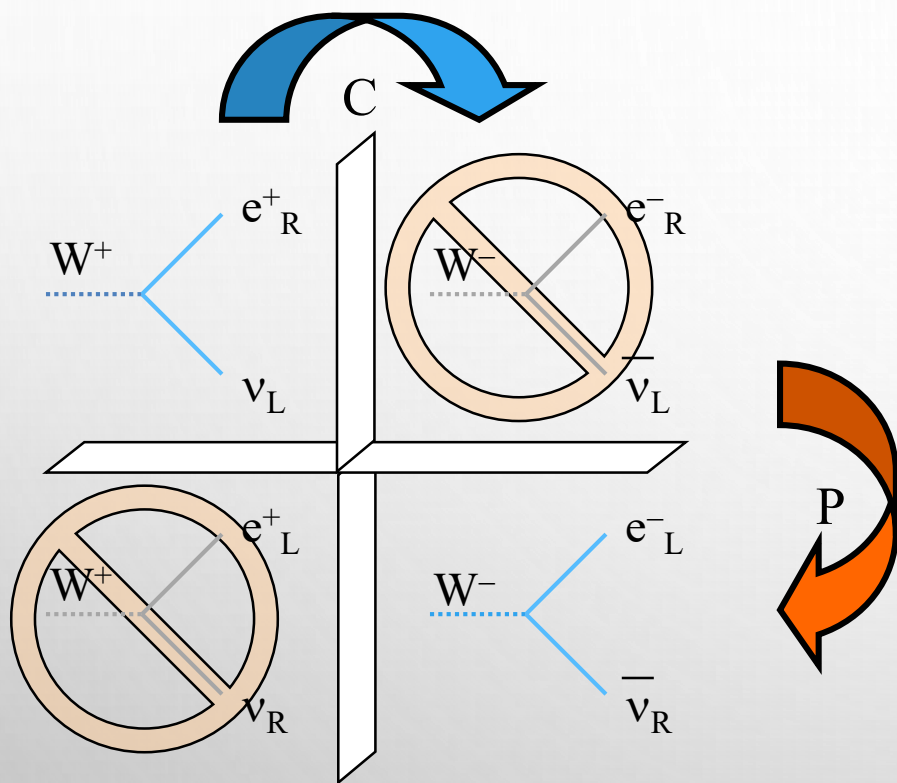
Transformacja parzystości



Czy parzystość przestrzenna jest niezmiennikiem?

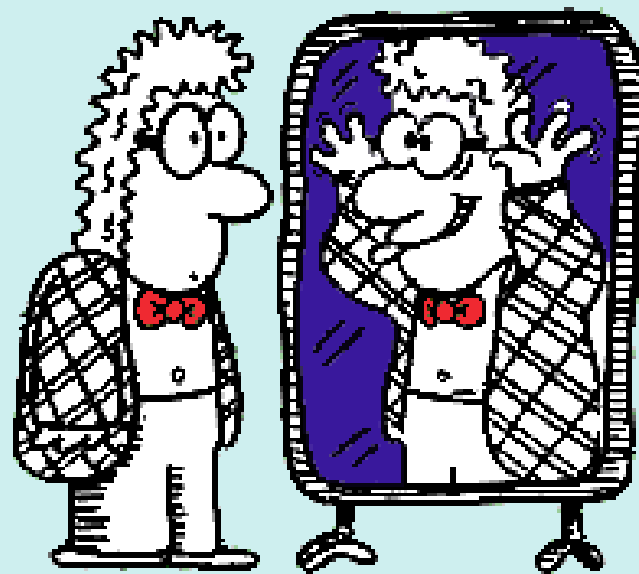
Częstość rozpadów symetryczna względem kierunku spinu!





- ODDZIAŁYWANIA SŁABE ŁAMIĄ SYMETRIE **C** I **P** **MAKSYMALNIE**
 - MATERIA JEST „LEWOSKRĘTNA” A ANTYMATERIA „PRAWOSKRĘTNA”.
- POMIMO MAKSYMALNEGO ŁAMANIA **C** I **P**, SYMETRIA KOMBINOWANA **CP** WYDAWAŁA SIĘ BYĆ ZACHOWANA...
- ALE W 1964, CHRISTENSON, CRONIN, FITCH AND TURLAY OKRYLI ŁAMANIE SYMETRII KOMBINOWANEJ **CP** W ROZPADACH NEUTRALNYCH KAONÓW!

THE MIRROR DID NOT SEEM TO
BE OPERATING PROPERLY.



Hej, Kosmici, z czego jesteście „zrobieni”?



Porównaj $K_L^0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}$ do $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$

Porównaj, proszę, elektron który występuje częściej z elektronem ze swojego ciała:

Jeżeli taki sam: **antymateria**

Jeżeli przeciwna to: **materia**



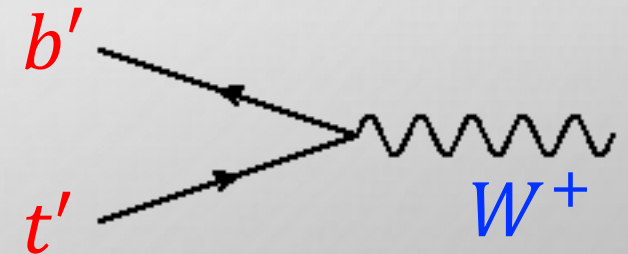
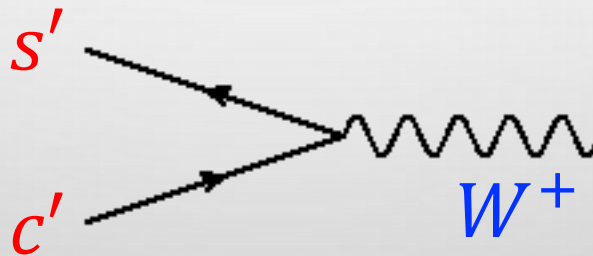
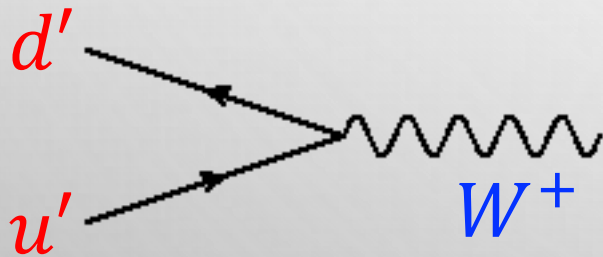
- ODDZIAŁYWANIA SŁABE W 100% ŁAMIAŁ PARZYSTOŚĆ PRZESTRZENNĄ.
 - WOLFGANG PAULI: „IT IS NONSENSE! THE EXPERIMENT MUST BE REPEATED.”



- Symetria $SU_L(2)$ dla bezmasowych kwarków:

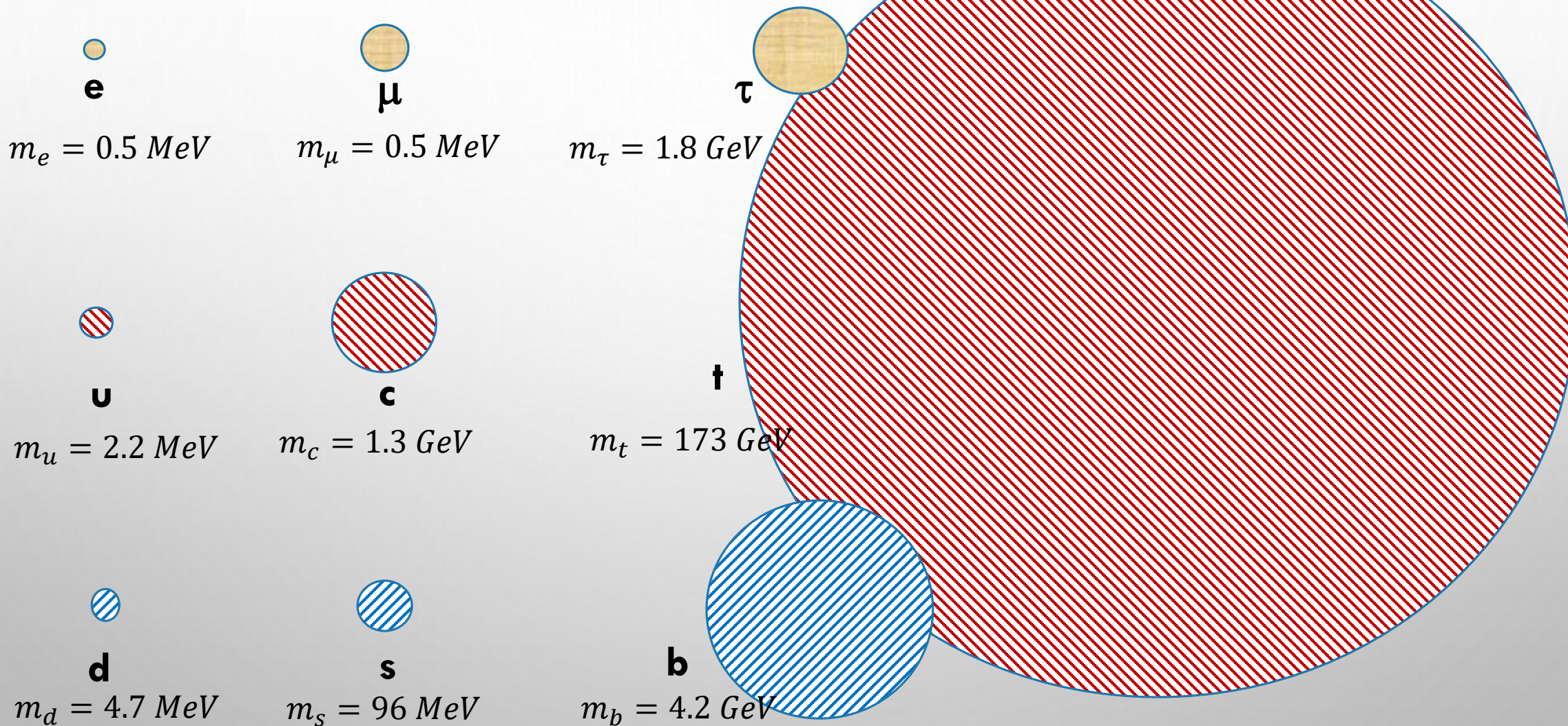
$$\mathcal{L}_W = \frac{g}{\sqrt{2}} u'_L \gamma_\mu W^\mu d'_L \quad \text{x3 !}$$

- Uniwersalność zapachowa: nie zależy od generacji.
 - Nie ma możliwości odróżnienia kwarku d' od kwarku s'



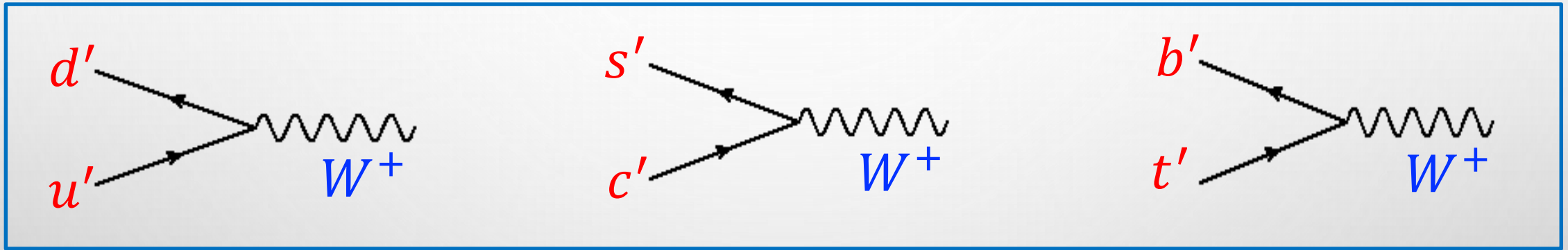
- Nie jest możliwe łamanie symetrii kombinowanej CP!!
 - Jak się zmienia ten obraz kiedy nadamy cząstkom masy?

- ODDZIAŁYWANIA SŁABE NIE ROZRÓŻNIAJĄ ZAPACHU
- MECHANIZM HIGGS'A I HIERARCHIA MAS...



$$\mathcal{L}_W = \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{u}'_L \gamma_\mu W^\mu d'_L$$

- NIE MA ŁAMANIA CP



Zmiana bazy: $u'_i = (V^u)_{ij} u_i$ oraz: $d'_i = (V^d)^\dagger_{ij} d_i$

(Baza oddziaływań)

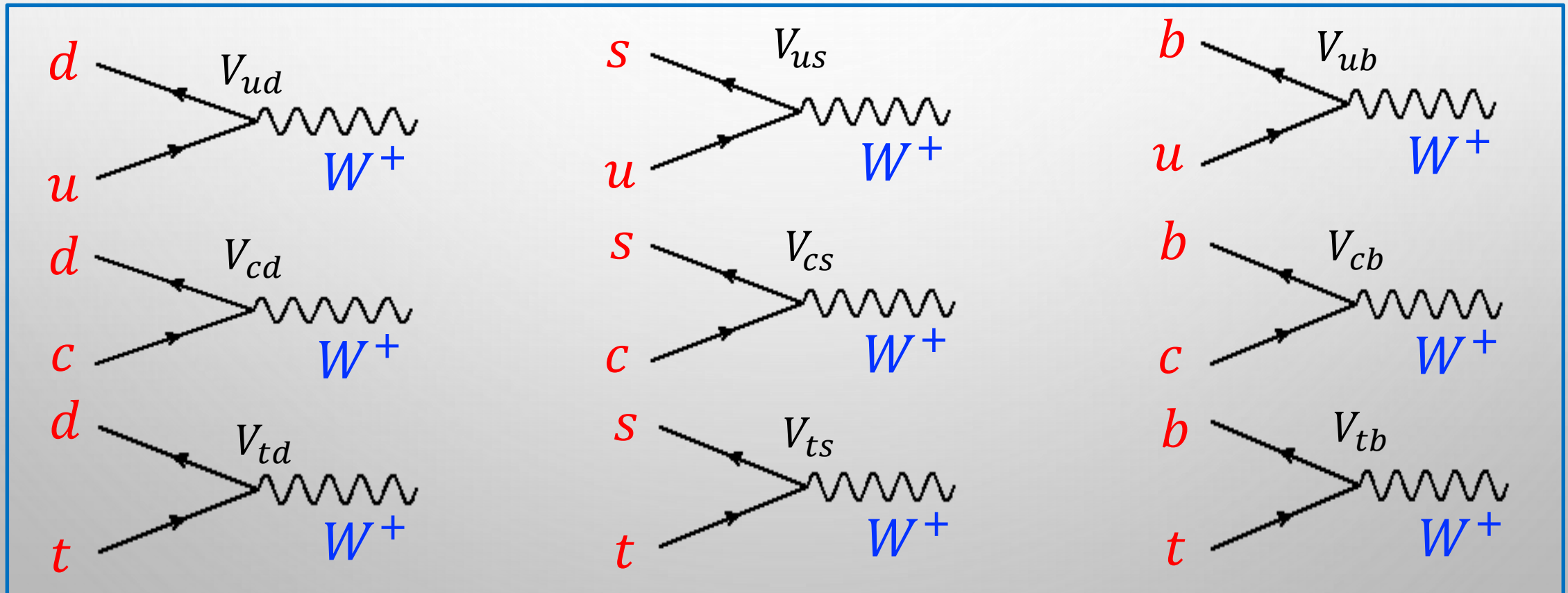
$$\mathcal{L}_W = \frac{g}{\sqrt{2}} u'_L \gamma_\mu W^\mu d'_L$$

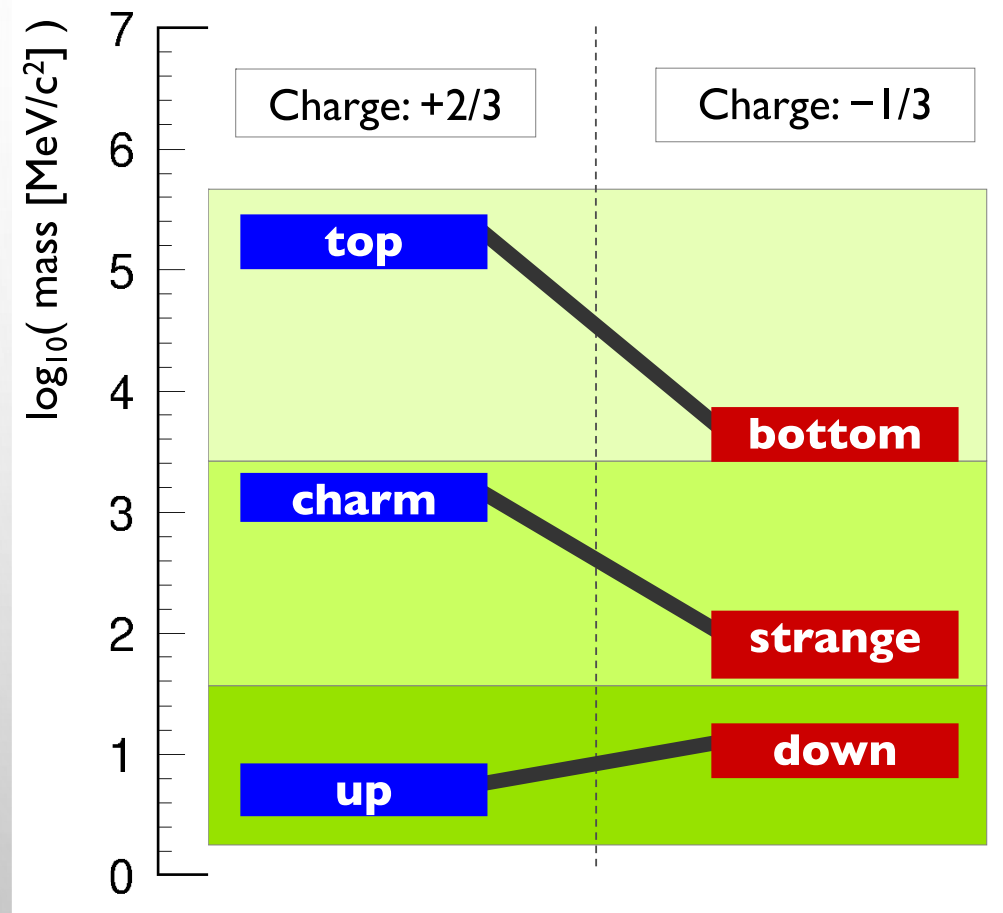
(Baza masy)

$$\mathcal{L}_W = \frac{g}{\sqrt{2}} V_{CKM} u_L \gamma_\mu W^\mu d_L$$

Zmiana bazy: $u'_i = (V^u)_{ij} u_i$ oraz: $d'_i = (V^d)^\dagger_{ij} d_i$

NOWA STRUKTURA ODDZIAŁYWAŃ SŁABYCH, *TERAZ MOŻEMY ZŁAMAĆ CP.*

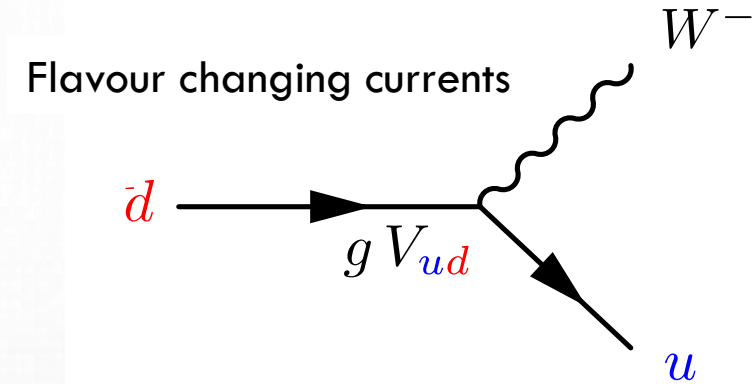




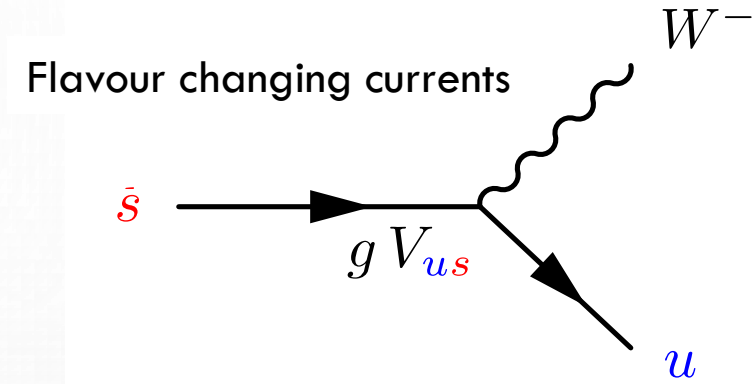
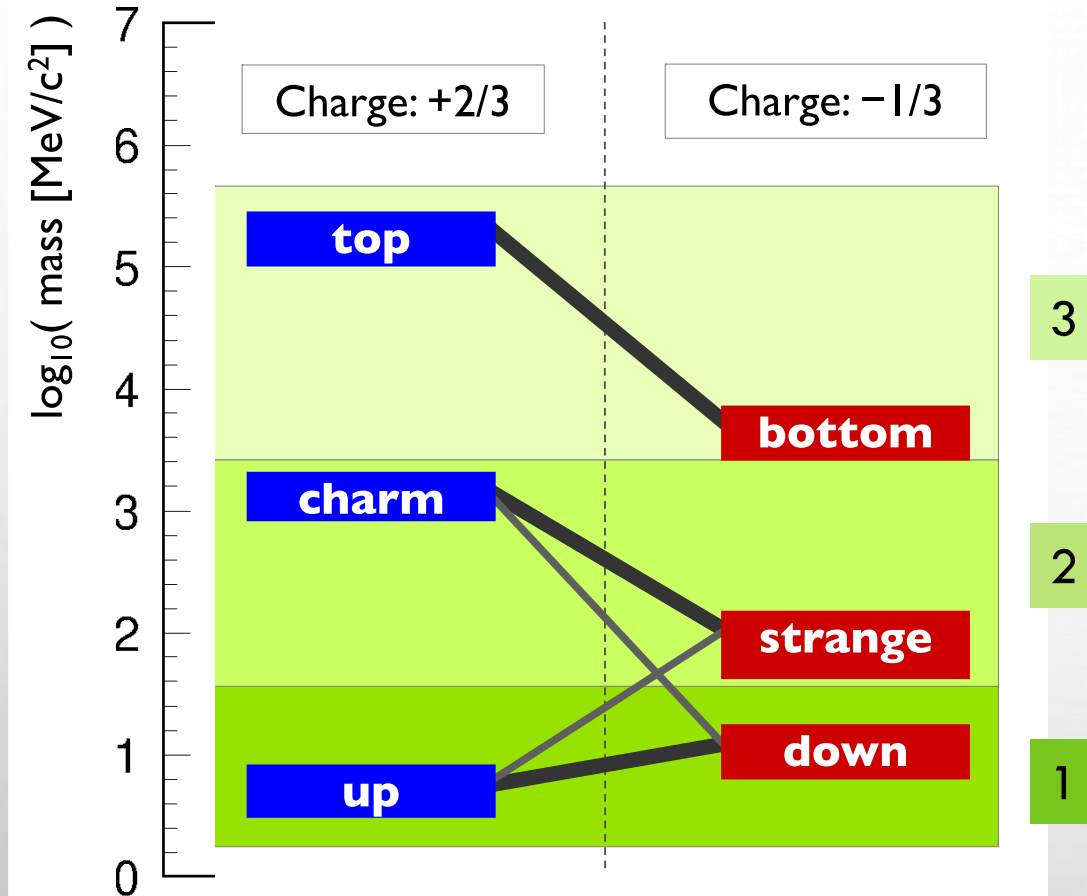
3

2

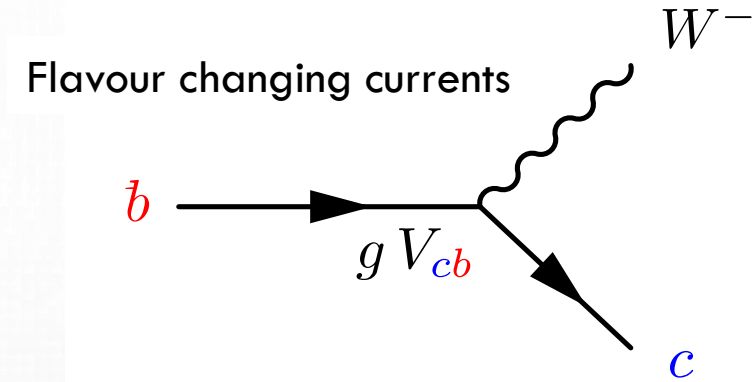
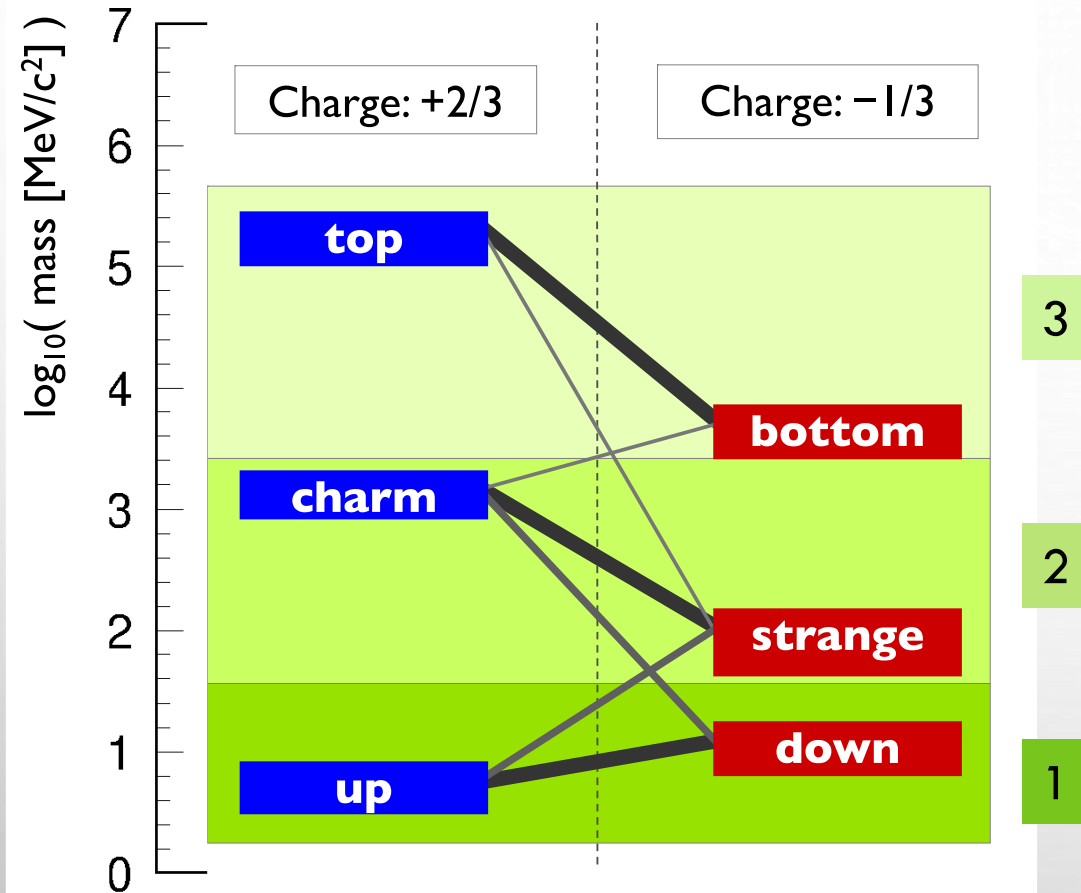
1



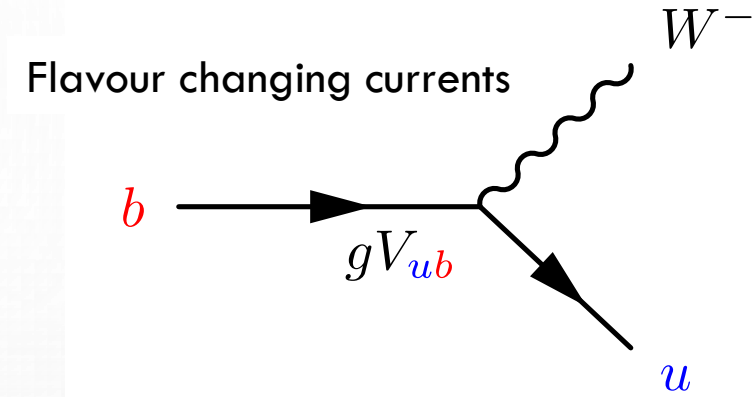
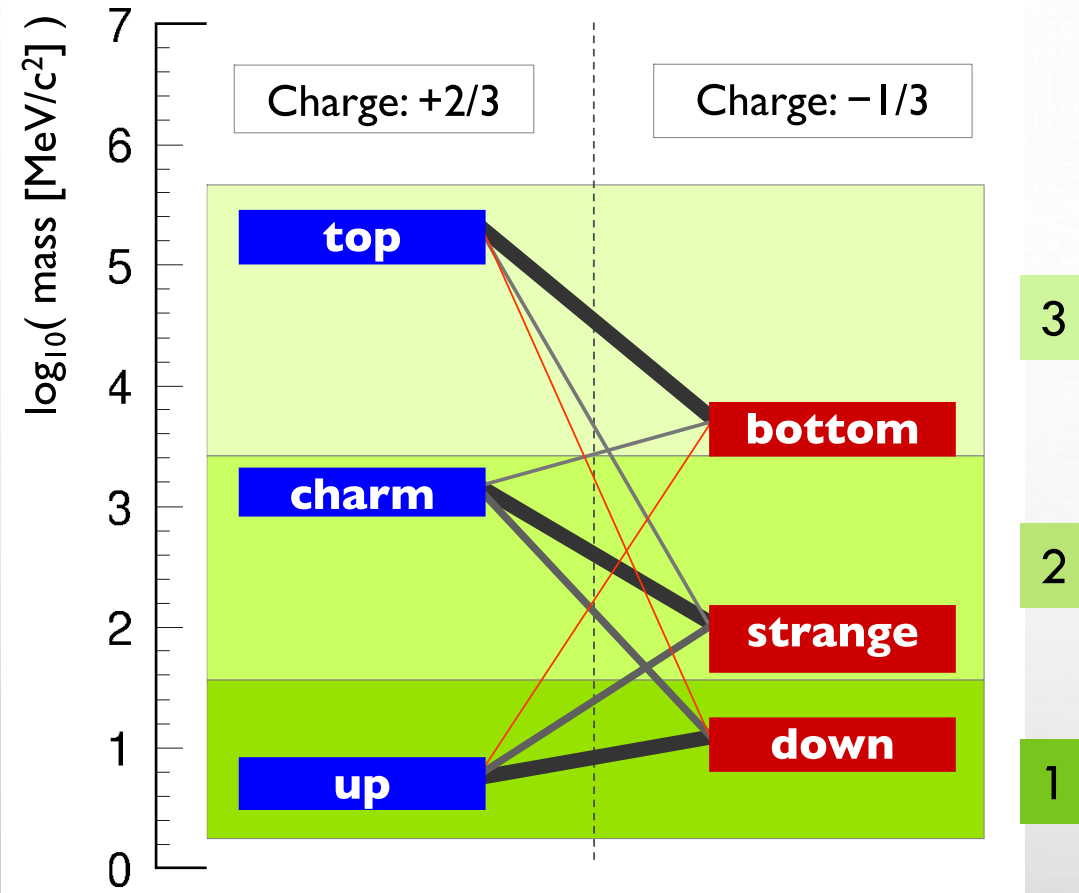
$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & & \\ & V_{cs} & \\ & & V_{tb} \end{pmatrix}$$



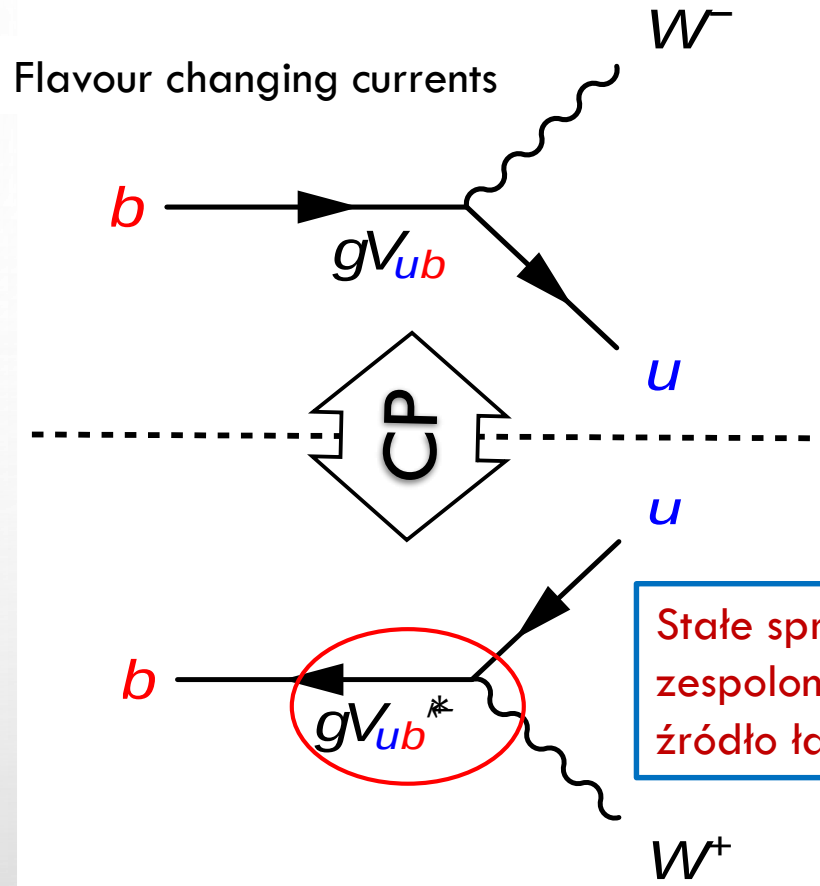
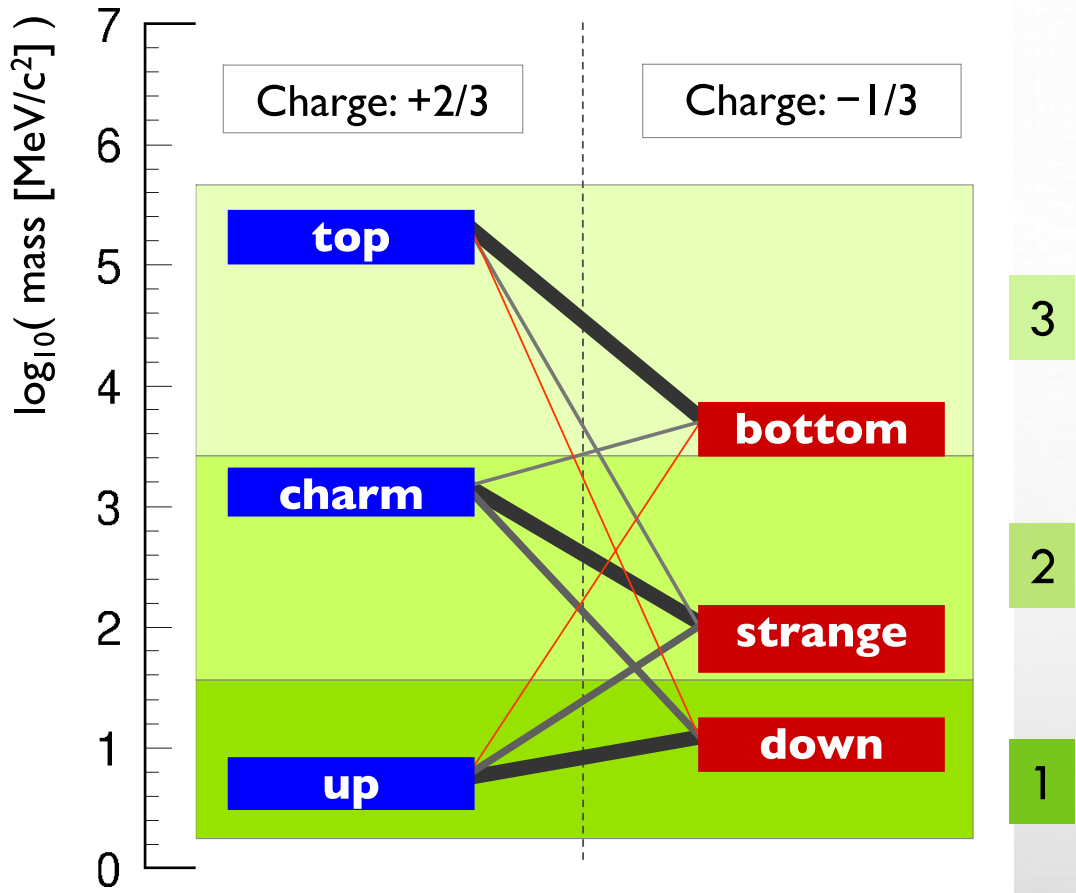
$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & \\ V_{cd} & V_{cs} & \\ & & V_{tb} \end{pmatrix}$$



$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$



$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$



Stałe sprzężenia są zespolone to jest źródło łamania CP!!

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

- Cząstki i antycząstki mają stałe sprzężenia, które są liczbami zespolonymi sprzężonymi (zbieżność nazw – przypadkowa...)

$$V_{CKM}: \begin{array}{c} d \quad s \quad b \\ \begin{array}{c} u \\ c \\ t \end{array} \begin{pmatrix} \boxed{V_{ud}} & \boxed{V_{us}} & \boxed{V_{ub}} \\ \boxed{V_{cd}} & \boxed{V_{cs}} & \boxed{V_{cb}} \\ \boxed{V_{td}} & \boxed{V_{ts}} & \boxed{V_{tb}} \end{pmatrix} \end{array}$$

- Parametryzacja Wolfenstein: $V_{CKM} =$

$$\begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

→ Jedna faza łamiąca CP

$$V_{CKM}: \begin{array}{c} d \quad s \\ \begin{array}{c} u \\ c \end{array} \begin{pmatrix} \boxed{V_{ud}} & \boxed{V_{us}} \\ \boxed{V_{cd}} & \boxed{V_{cs}} \end{pmatrix} \end{array}$$

$$V_{CKM} =$$

$$\begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & \lambda \\ -\lambda & 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 \end{pmatrix}$$

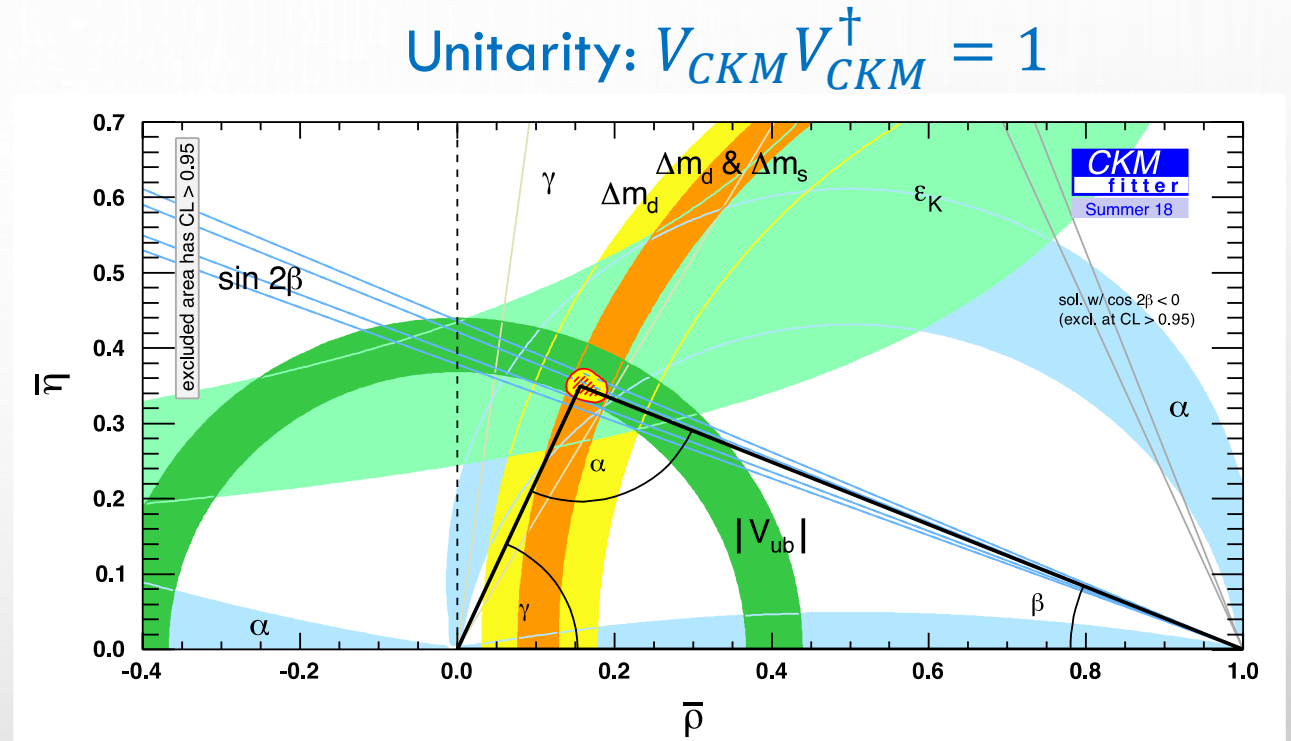
→ CP zachowane

- 3 generacje to minimalna reprezentacja, która pozwala na łamanie CP (MS).

$$V_{CKM}: \begin{array}{c} d \quad s \quad b \\ \begin{array}{c} u \\ c \\ t \end{array} \begin{pmatrix} \boxed{V_{ud}} & \boxed{V_{us}} & \boxed{V_{ub}} \\ \boxed{V_{cd}} & \boxed{V_{cs}} & \boxed{V_{cb}} \\ \boxed{V_{td}} & \boxed{V_{ts}} & \boxed{V_{tb}} \end{pmatrix} \end{array}$$

- Parametryzacja Wolfenstein'a: $V_{CKM} =$

$$\begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}|e^{-i\gamma} \\ -|V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}|e^{-i\beta} & -|V_{ts}|e^{i\beta_s} & |V_{tb}| \end{pmatrix}$$



CP violation:

→ Surface $\neq 0$

→ Non-zero CP-phases.

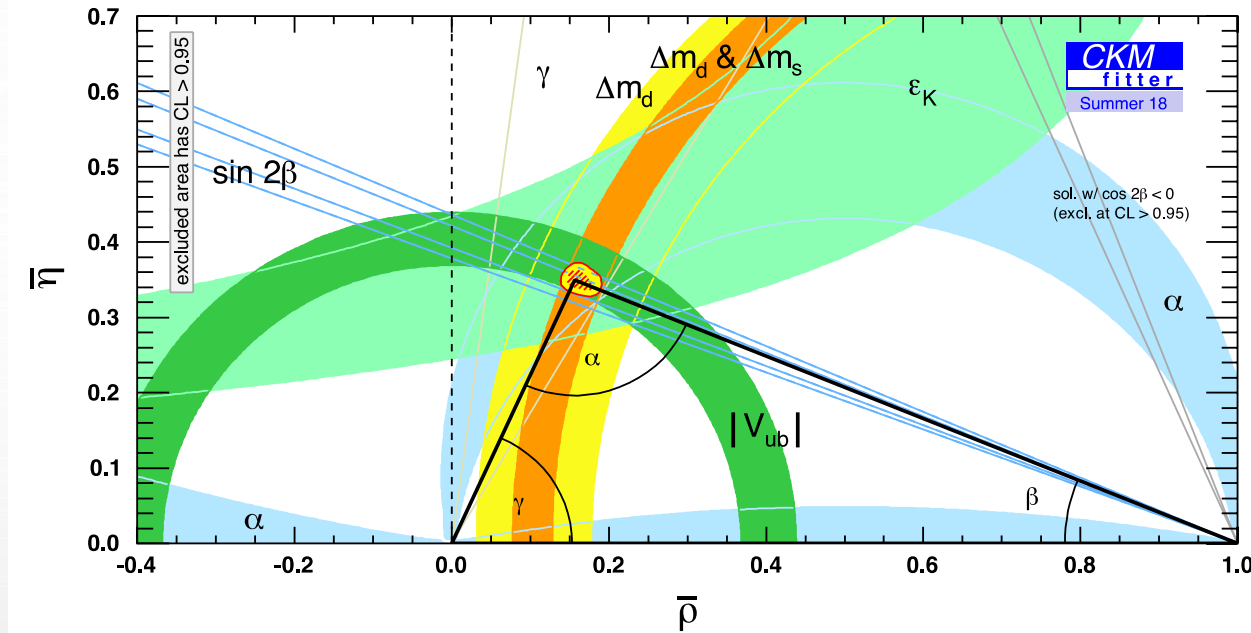
- DUŻY EFEKT ŁAMANIA CP WYMAGA DUŻEGO MIESZANIA I FAZ.
- POWIERZCHNIA TRÓJKĄTA UNITARNOŚCI
- NIEZMIENNIK JARLSKOG: $J = 3 \times 10^{-5}$
- CP wymaga również istnienia co najmniej trzech generacji kwarków z innymi masami

$$\begin{aligned} & \blacksquare m_u \neq m_c ; m_c \neq m_t ; m_t \neq m_u \\ & \blacksquare m_d \neq m_s ; m_s \neq m_b ; m_b \neq m_d \end{aligned}$$

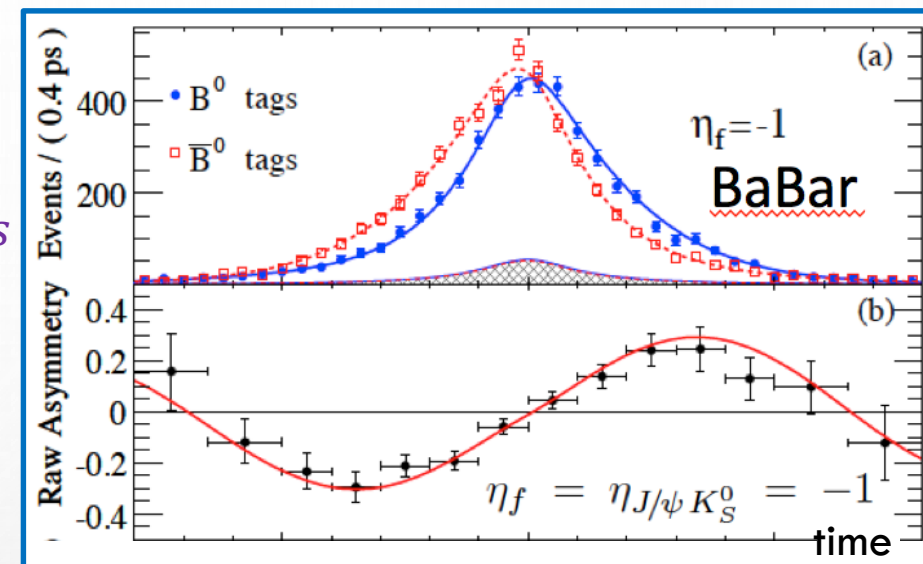
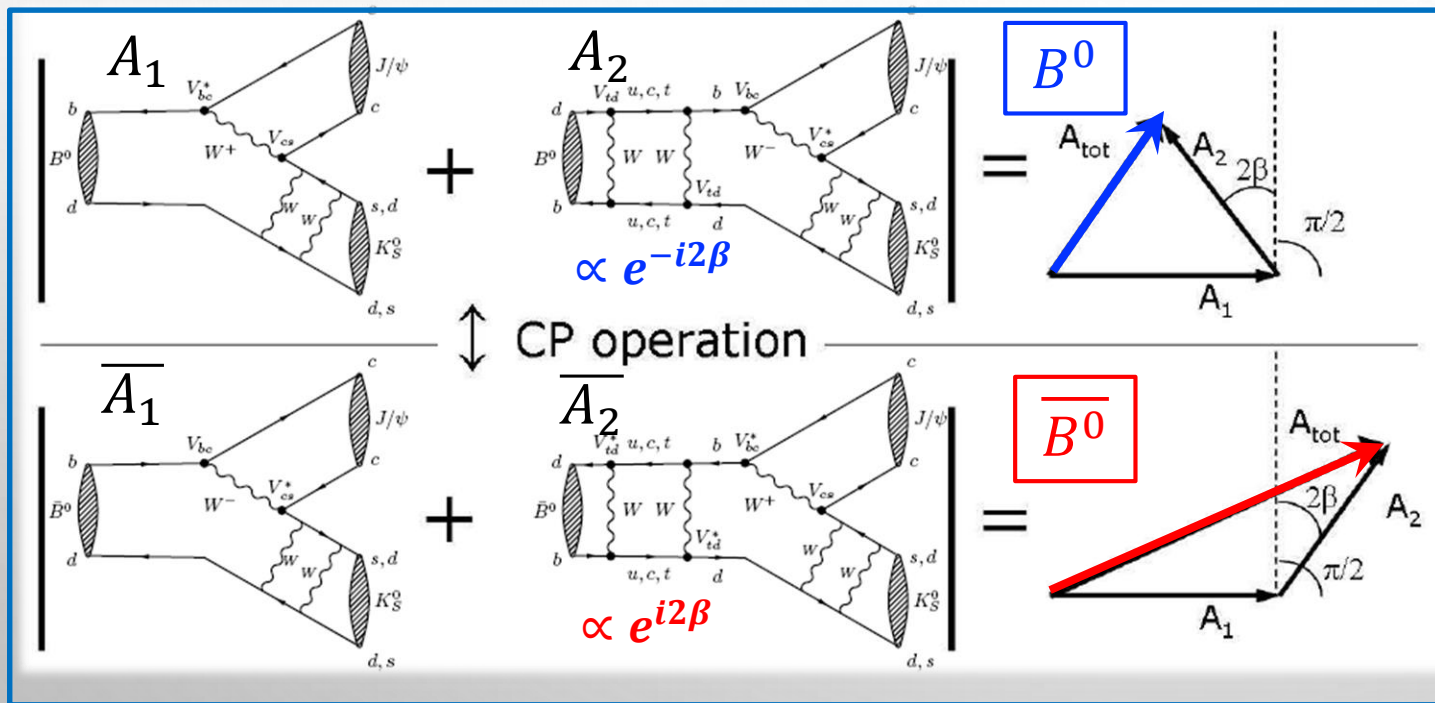
- Jarlskog (1987) stopień łamania CP

$$- \det[M_u M_u^\dagger, M_d M_d^\dagger] = 2 i J (m_t^2 - m_c^2)(m_c^2 - m_u^2)(m_u^2 - m_t^2) \\ \times (m_b^2 - m_s^2)(m_s^2 - m_d^2)(m_d^2 - m_b^2)$$

$$M_{ij} = Y_{ij} v / \sqrt{2}$$



- Przejście kwantowe z dwoma amplitudami A_1 i A_2 :
 - Eg.: $A_1 = B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ and $A_2 = B^0 \rightarrow \bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S$



$$|A_1| = |\bar{A}_1|, |A_2| = |\bar{A}_2|, \\ \text{but } |A_1 + A_2| \neq |\bar{A}_1 + \bar{A}_2|$$

ŁAMANIE CP : EKSPERYMENT Z „DWOMA SZCZELINAMI”

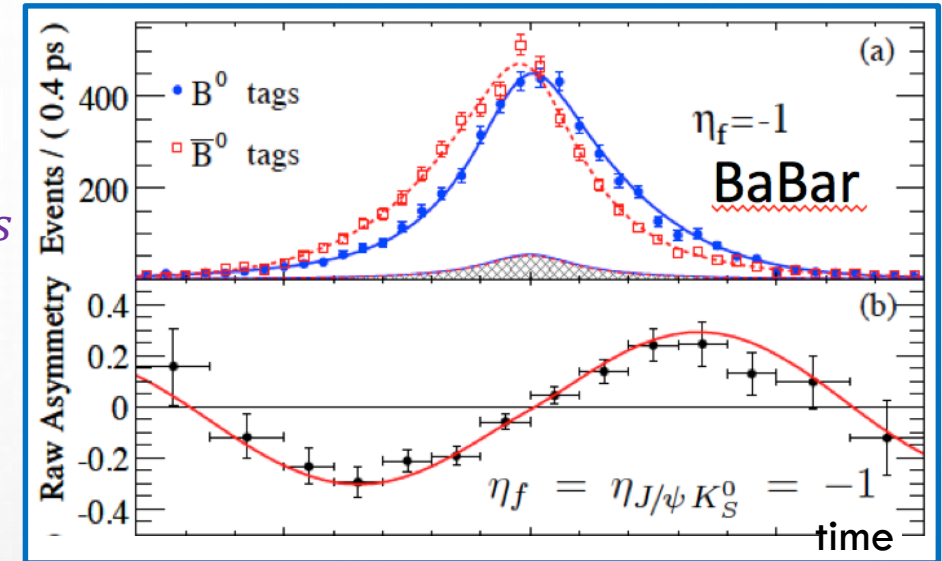
- Przejście kwantowe z dwoma amplitudami A_1 i A_2 :
 - Eg.: $A_1 = B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ and $A_2 = B^0 \rightarrow \bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S$

$$A = A_1 + A_2 e^{i\phi} e^{i\delta} \quad \bar{A} = A_1 + A_2 e^{-i\phi} e^{i\delta}$$

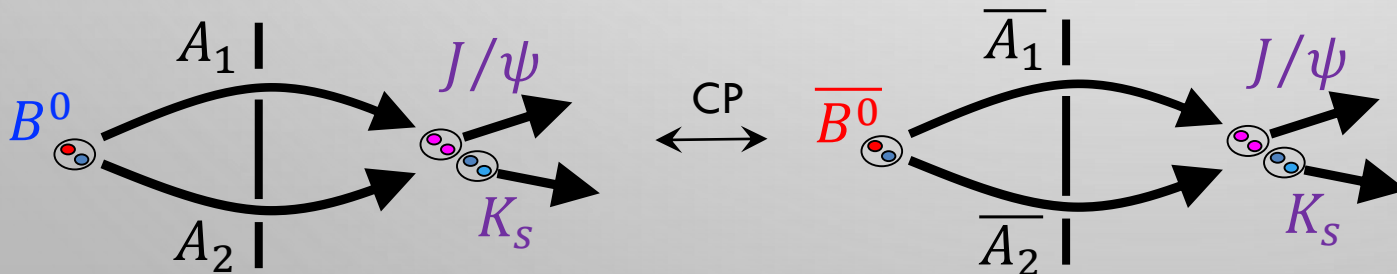
$$|A|^2 = |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1 A_2 (e^{i\phi} e^{i\delta} + e^{-i\phi} e^{-i\delta})$$

$$|\bar{A}|^2 = |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1 A_2 (e^{-i\phi} e^{i\delta} + e^{i\phi} e^{-i\delta})$$

$$|A - \bar{A}|^2 = 4 A_1 A_2 \sin \phi \sin \delta$$



$$|A_1| = |\bar{A}_1|, |A_2| = |\bar{A}_2|, \\ \text{but } |A_1 + A_2| \neq |\bar{A}_1 + \bar{A}_2|$$



- Łamanie CP to efektywnie interferencja kwantowo mechaniczna!!

SPOSOBY ŁAMANIA CP

$$\left| \begin{array}{c} D^0 \\ \rightarrow \text{blue circle} \rightarrow \bar{D}^0 \\ \rightarrow \text{green circle} \rightarrow \text{green lines} \end{array} \bar{f} \right|^2 \neq \left| \begin{array}{c} \bar{D}^0 \\ \rightarrow \text{green circle} \rightarrow D^0 \\ \rightarrow \text{blue circle} \rightarrow \text{blue lines} \end{array} f \right|^2$$

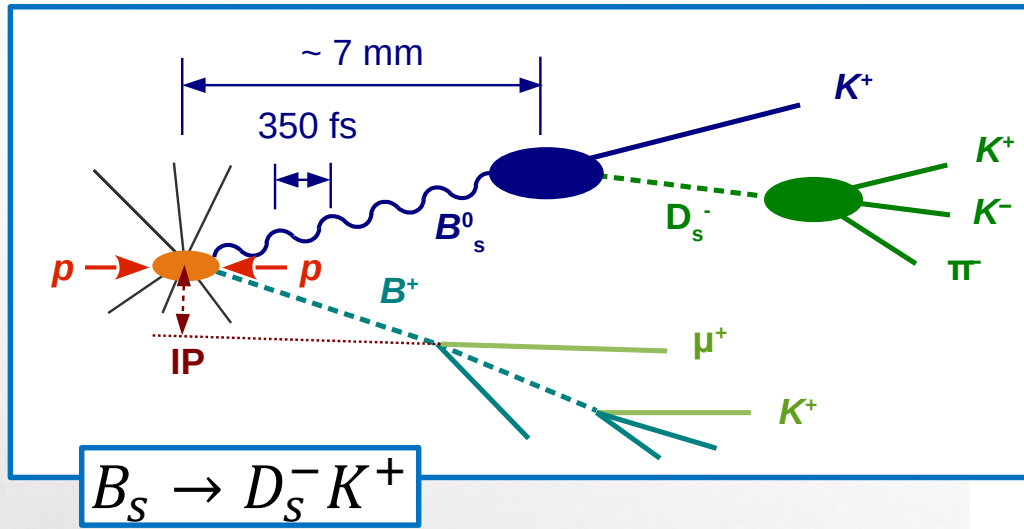
$$\left| \begin{array}{c} D^0 \\ \rightarrow \text{blue circle} \rightarrow \text{blue lines} \end{array} f \right|^2 \neq \left| \begin{array}{c} \bar{D}^0 \\ \rightarrow \text{green circle} \rightarrow \text{green lines} \end{array} \bar{f} \right|^2$$

$$\left| \begin{array}{c} D^0 \\ \rightarrow \text{blue circle} \rightarrow \text{blue lines} \end{array} f + \begin{array}{c} D^0 \\ \rightarrow \text{blue circle} \rightarrow \bar{D}^0 \\ \rightarrow \text{green circle} \rightarrow \text{green lines} \end{array} \bar{f} \right|^2 \neq \left| \begin{array}{c} \bar{D}^0 \\ \rightarrow \text{green circle} \rightarrow \text{green lines} \end{array} \bar{f} + \begin{array}{c} \bar{D}^0 \\ \rightarrow \text{green circle} \rightarrow D^0 \\ \rightarrow \text{blue circle} \rightarrow \text{blue lines} \end{array} f \right|^2$$

CZY AUDYTORIUM ŚPI...?



EKSPERYMENT LHCB

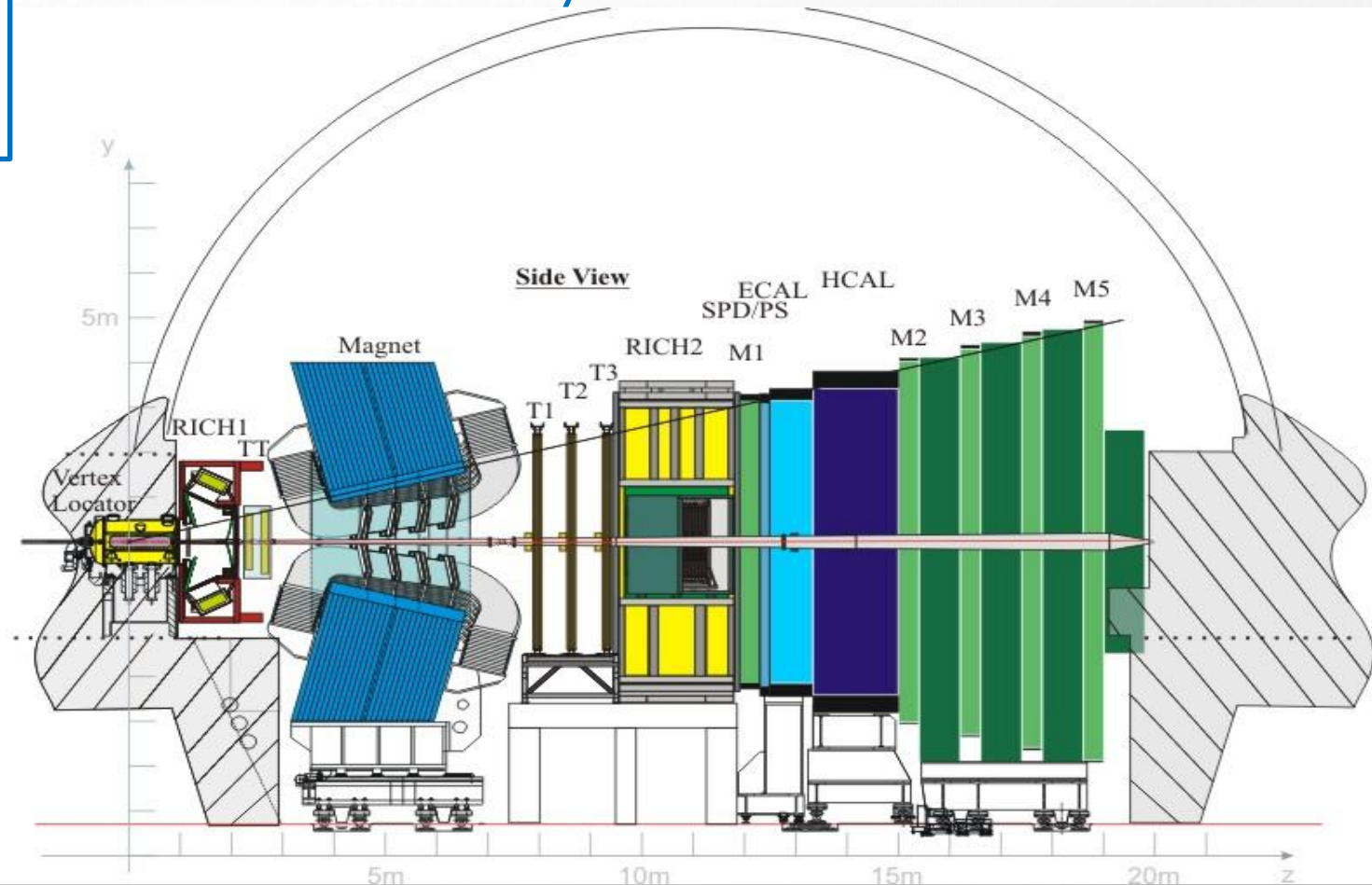


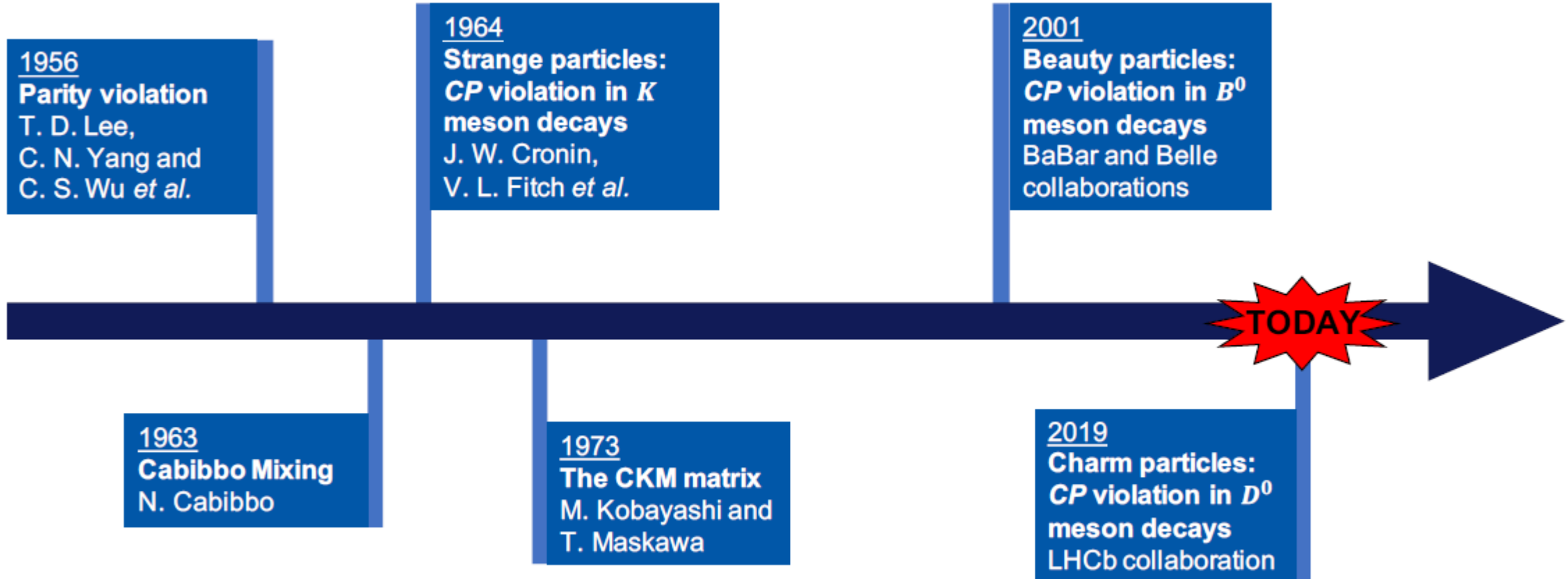
Wymagania Fizyczne:

- Wydajna dyskryminacja tła
- Znakowanie zapachu: B lub $\bar{B}$
- Pomiar czasu życia

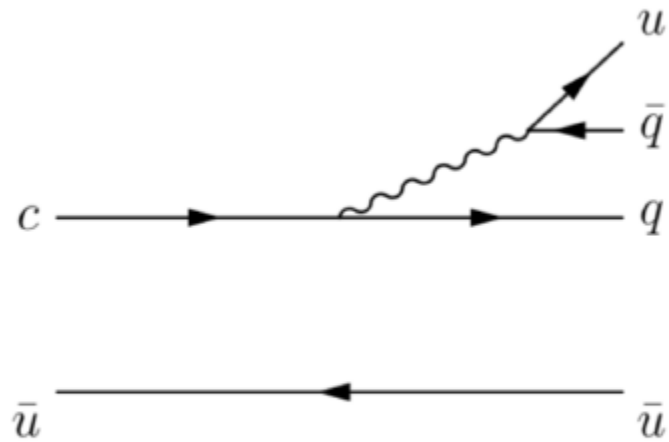
Wymagania sprzętowe:

- Doskonała rekonstrukcja wierzchołków
- Rekonstrukcja pędu i masy
- PID(π, K, μ, e, γ)
- Tryger (rekonstrukcja w czasie rzeczywistym)



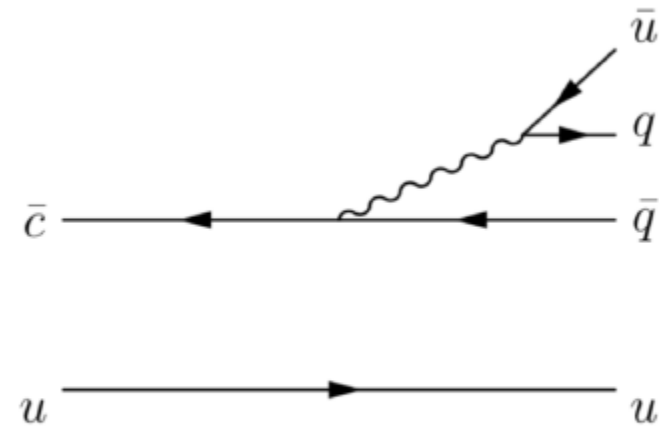


Tree level



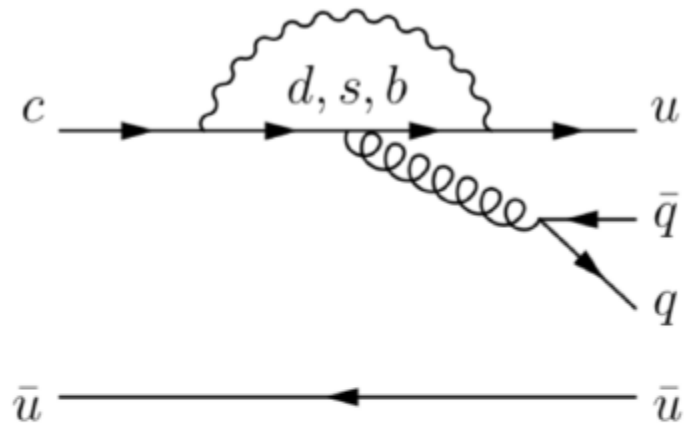
$$A_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{i\theta_1}$$

CP



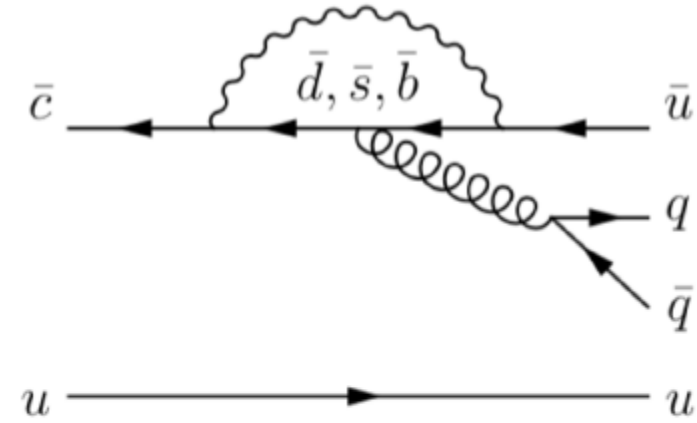
$$\bar{A}_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{-i\theta_1}$$

Loop level



$$A_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{i\theta_2}$$

CP



$$\bar{A}_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{-i\theta_2}$$

$$|\bar{A}_1 + \bar{A}_2|^2 - |A_1 + A_2|^2 = 4\rho_1\rho_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\delta_1 - \delta_2)$$

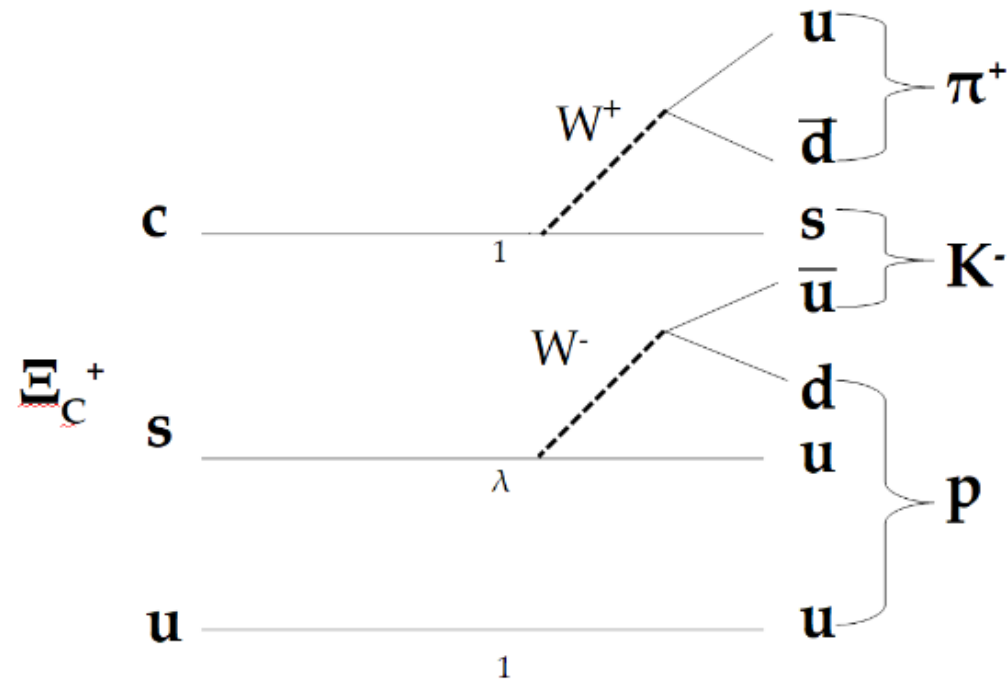
$$\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}$$

5.3 standard deviations from zero

This is the first **observation** of CP violation in the decay of **charm** hadrons

ANATOMIA ROZPADU

$$\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$$

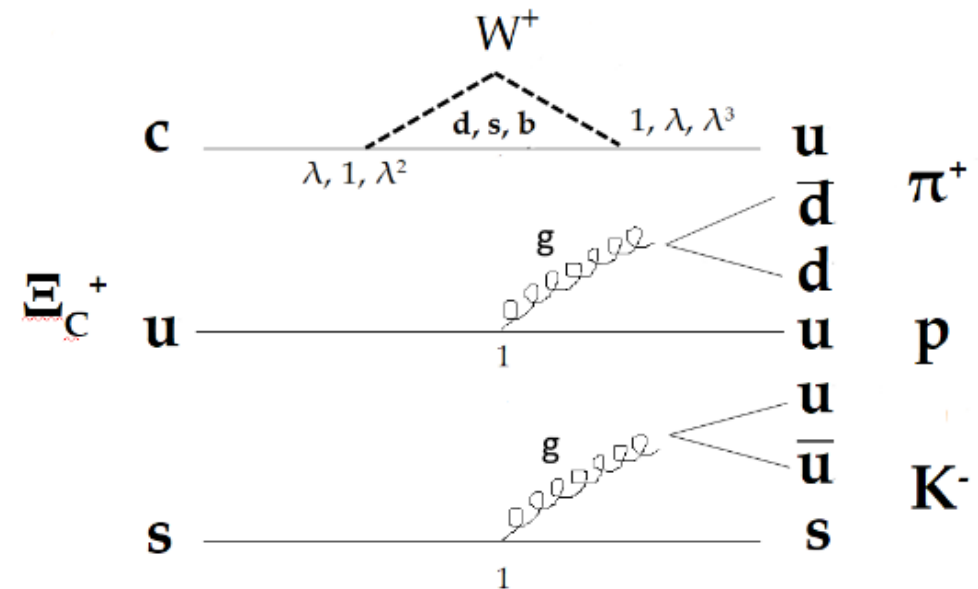


$$A_T \sim \lambda T$$

AGH+NCBJ (JAKUB, TOMASZ + ARTUR)

Eur. Phys. J. C80 (2020) 986

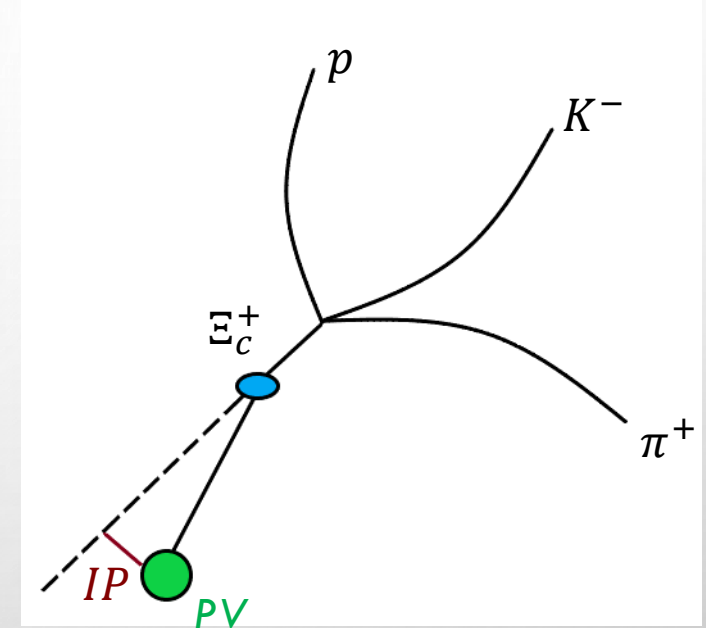
$$P \sim \lambda P_d + \lambda P_s + \lambda^5 P_b$$



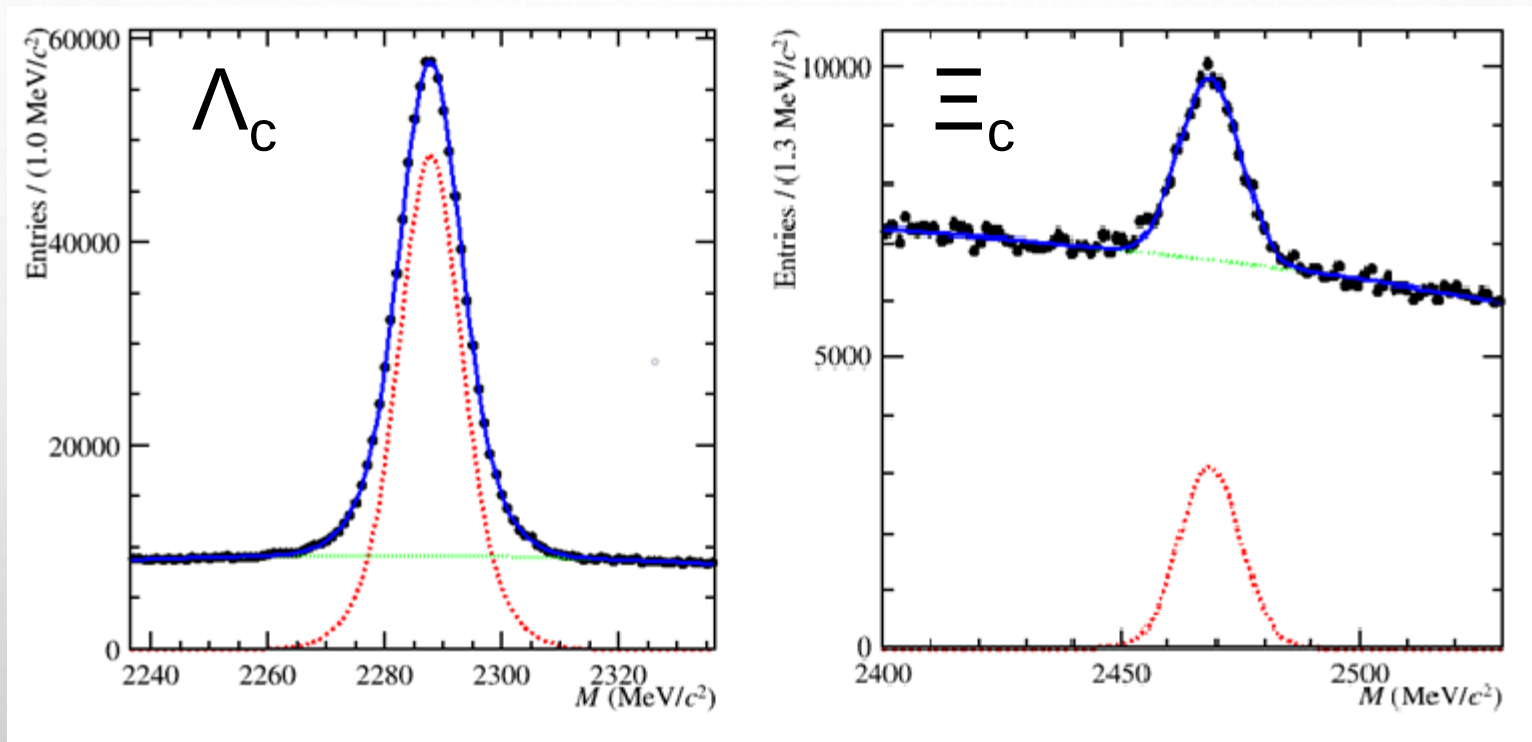
TOPOLOGIA ROZPADU

$$\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$$

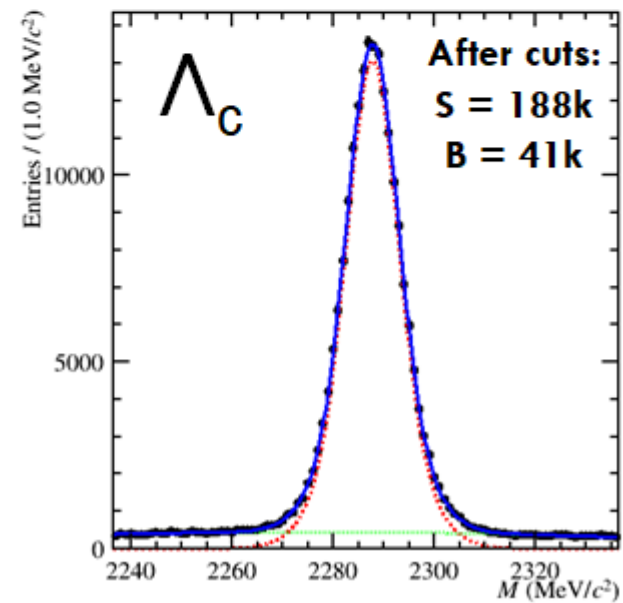
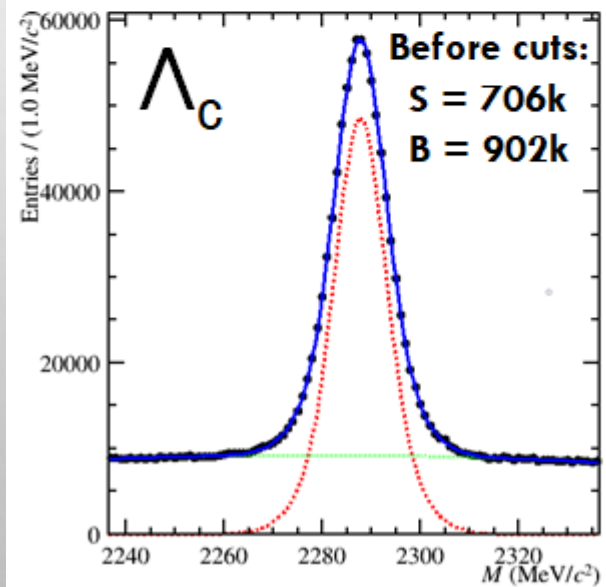
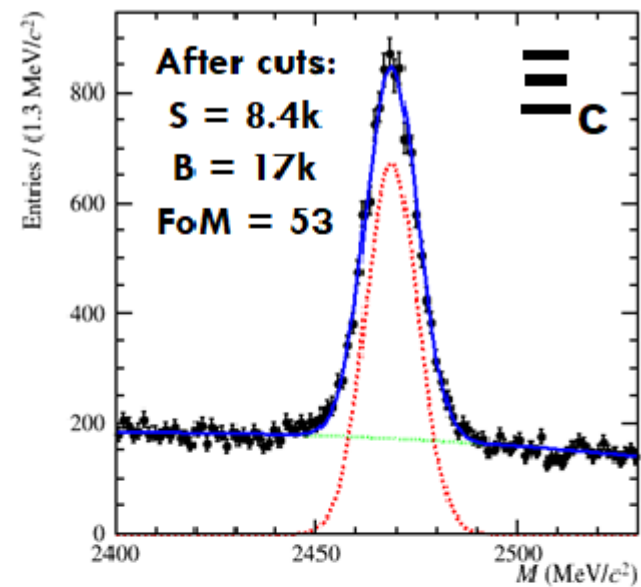
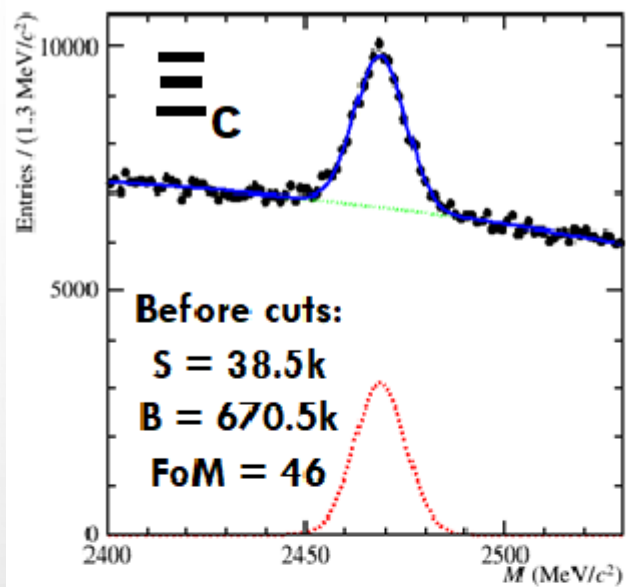
- Proton/Kaon/Pion
 - PID
 - ProbNN
 - $\text{IP}\chi^2$
 - TRACK_GhostProb
 - momentum
- Charm baryon
 - Vertex χ^2/ndof
 - $\text{IP}\chi^2$
 - Transverse momentum
 - DIRA
 - $\text{FD}\chi^2$
 - Pseudorapidity η



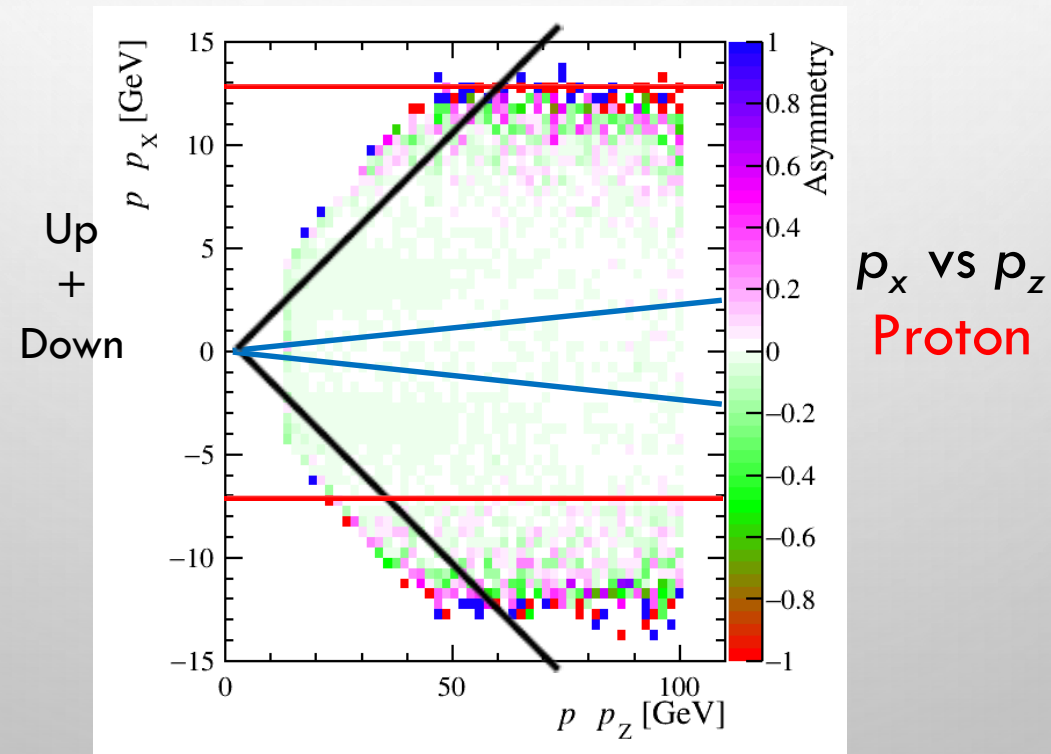
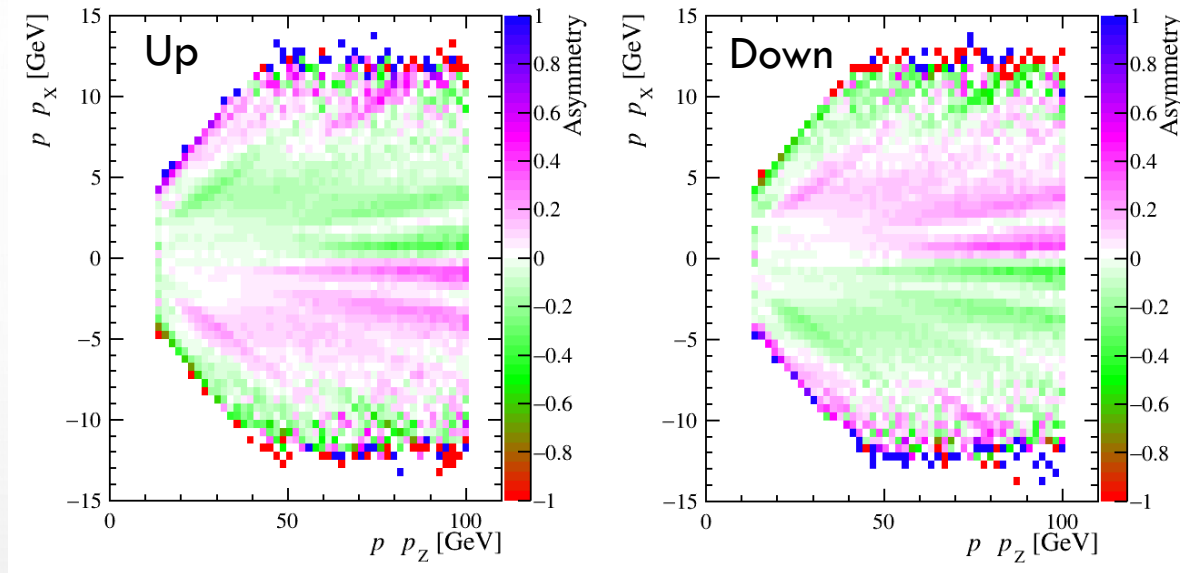
LINIA „STRIPPINGOWA” AKA TURBO



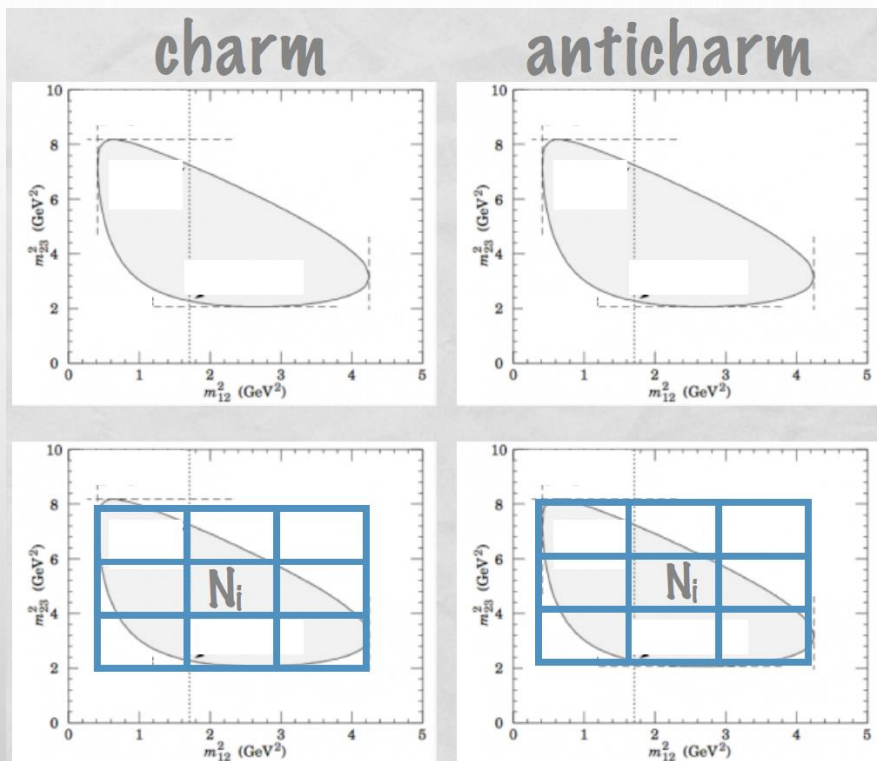
SELEKCJA SYGNAŁU



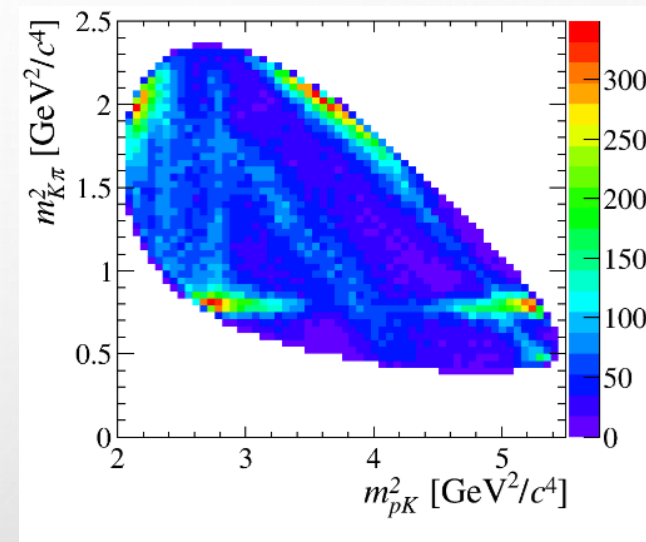
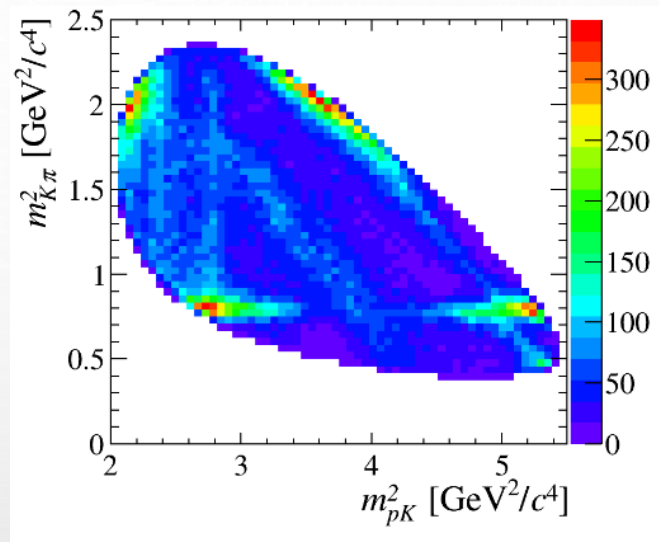
POPRAWKI APARATUROWE



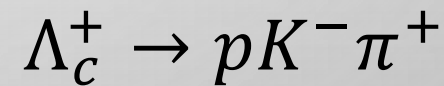
POMIAR ASYMETRII



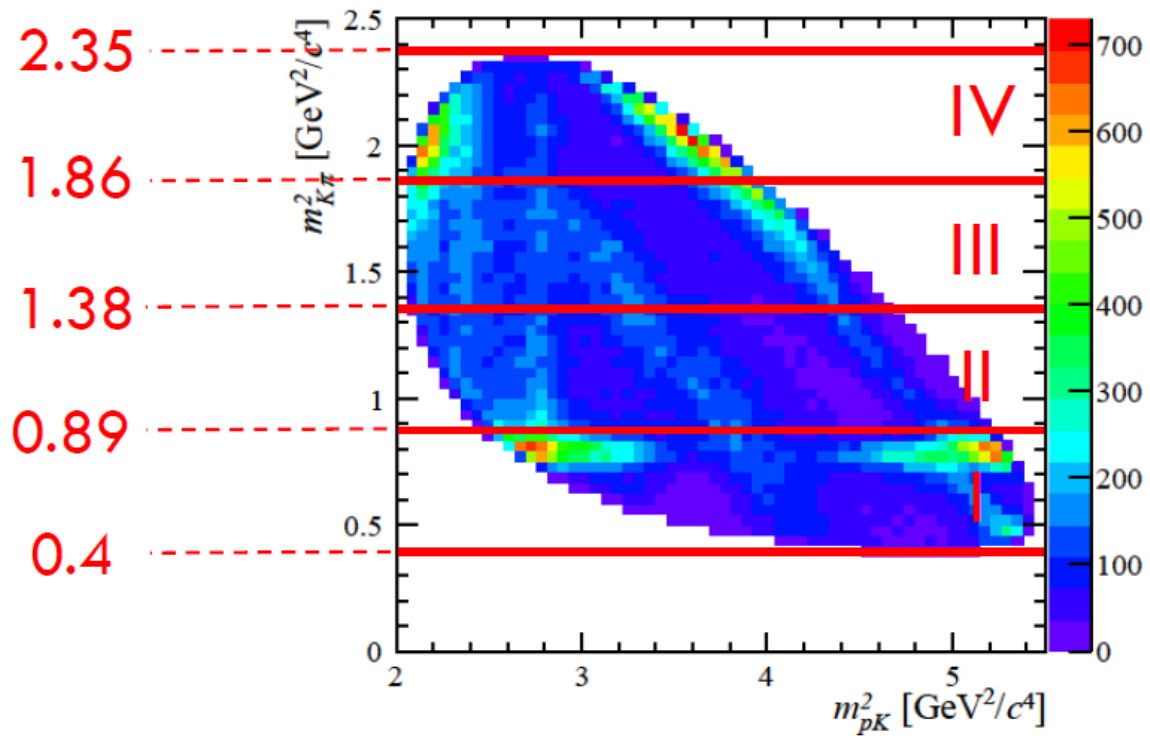
$$S_{CP}^i = \frac{N_i^+ - \alpha N_i^-}{\sqrt{\alpha(N_i^+ + N_i^-)}}$$



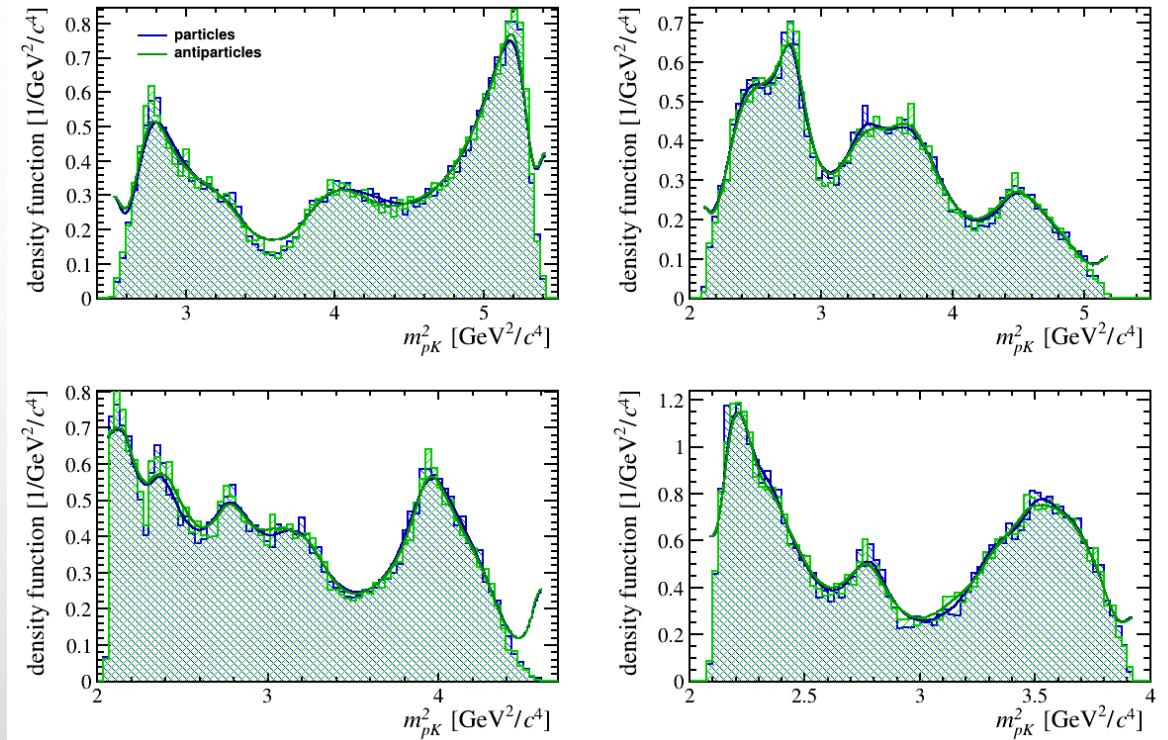
KANAŁ KONTROLNY
CZĄSTKI I ANTYCZĄSTKI



KDE



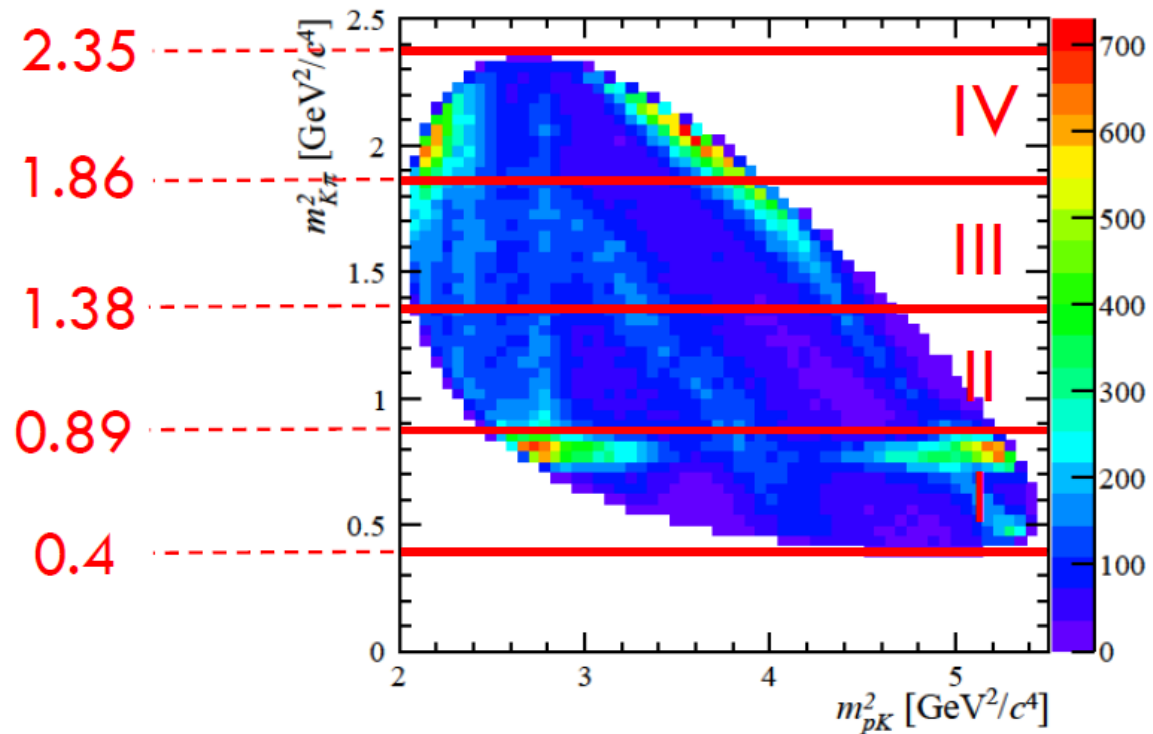
BE INNOVATIVE



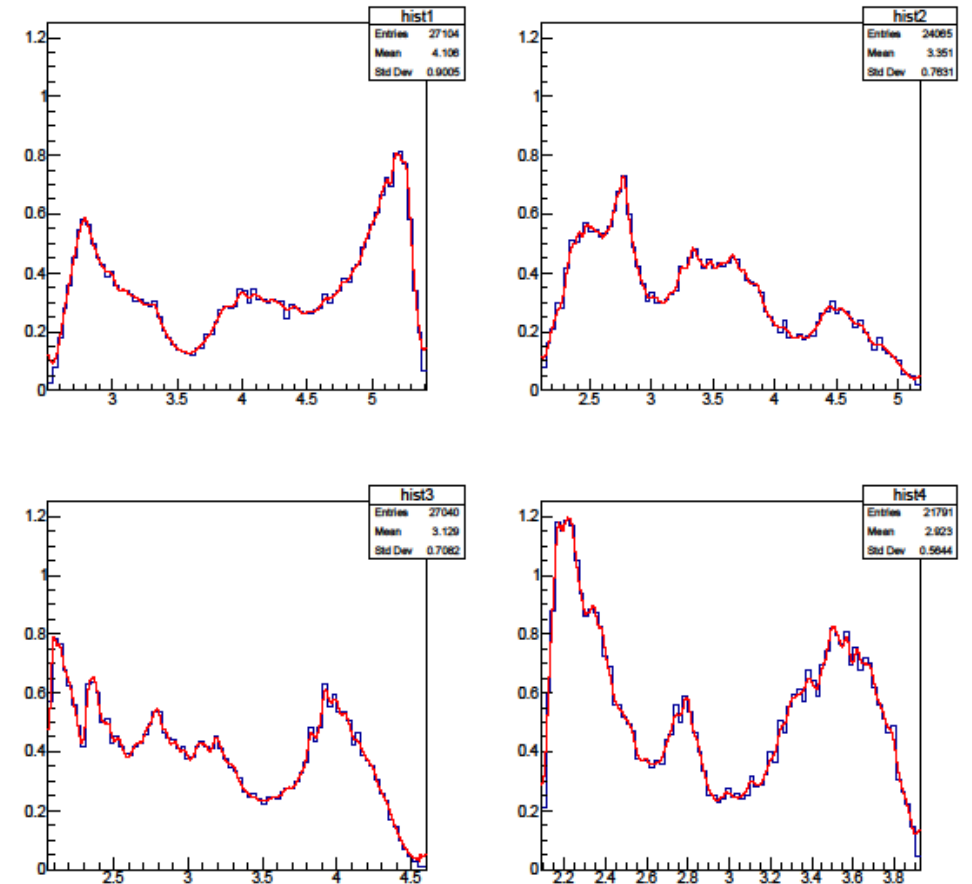
$$f(\hat{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega(x - x_i, h) \quad \omega(t, h) = \frac{1}{h} K\left(\frac{t}{h}\right)$$

BE INNOVATIVE

KDE

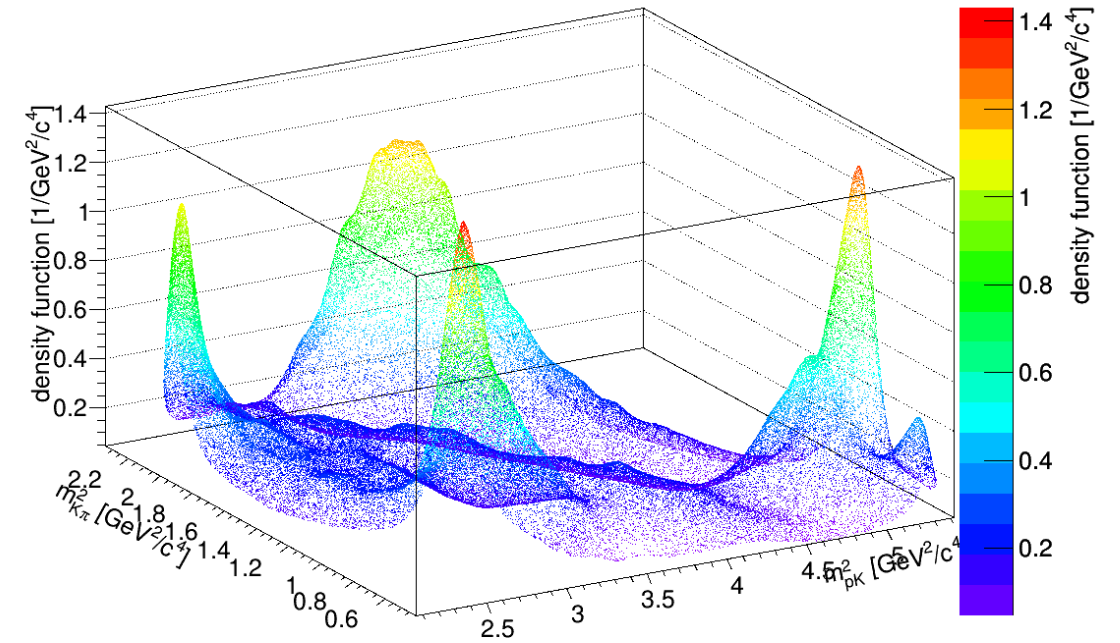
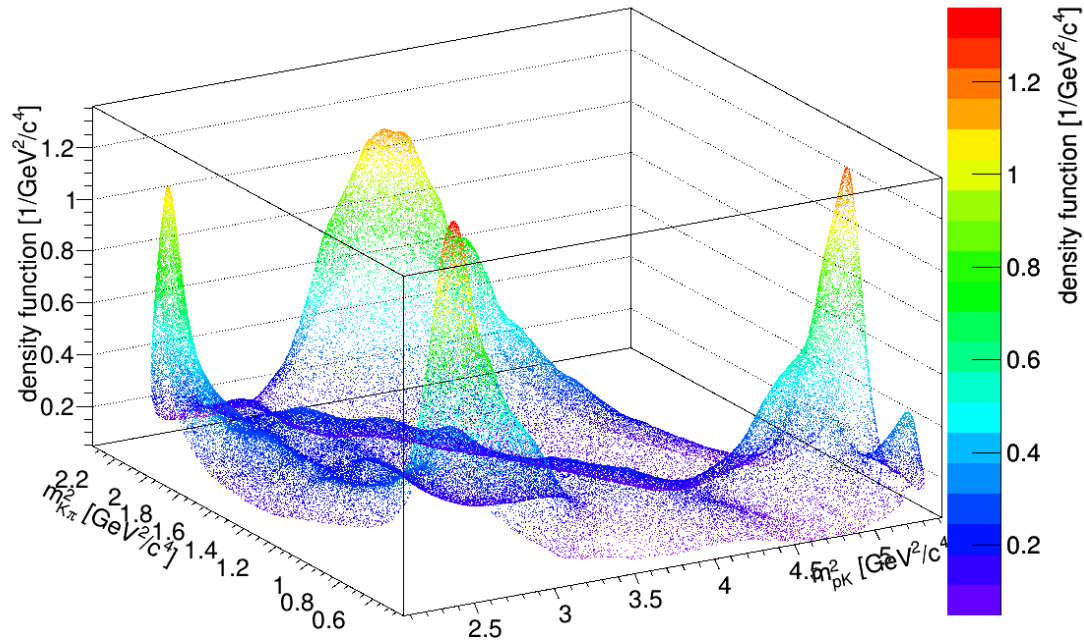


$$f(\hat{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega(x - x_i, h) \quad \omega(t, h) = \frac{1}{h} K\left(\frac{t}{h}\right)$$



BE INNOVATIVE, AND GO BEYOND!

WE HAVE LARGE SAMPLE, DEVELOP A FULL 2D
TECHNIQUE BASED ON DALITZ SPACE



KANAŁ KONTROLNY
CZĄSTKI I ANTYCZĄSTKI

$$\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$$

LOST PROPERTY



"Sorry Doc, we had a load of Anti-Matter around 13 billion years ago, but it got lost when we moved"

KONIEC!

- Parzystość przestrzenna: $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$

- Mass m	$P m = m$	: skalar
- Force $\vec{F}$ ($\vec{F} = d\vec{p}/dt$)	$P \vec{F} = P d\vec{p}/dt = -d\vec{p}/dt = -\vec{F}$	: wektor
- Acceleration $\vec{a}$ ($\vec{a} = d^2\vec{x}/dt^2$)	$P \vec{a} = -d^2x/dt^2 = -\vec{a}$	: wektor
- Angular momentum $\vec{L}, \vec{S}, \vec{J}$ ($\vec{L} = \vec{x} \times \vec{p}$)	$P \vec{L} = -\vec{x} \times -\vec{p} = \vec{L}$	: wektor osiowy

- P: Prawa Newtona nie są czułe względem P (świat lustrzany taki sam!):

$$\vec{F} = m \vec{a} \xrightarrow{P} -\vec{F} = -m\vec{a} \Leftrightarrow \vec{F} = m\vec{a}$$

- C: Siła Lorentza w świecie lustrzanym C jest taka sama:

$$\vec{F} = q [\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}] \xrightarrow{C} \vec{F} = -q [-\vec{E} + (-\vec{v}) \times \vec{B}]$$

- T: prawa fizyki są niezmiennicze względem operacji T:

$$\vec{F} = m \vec{a} = m \frac{d^2\vec{x}}{dt^2} \xrightarrow{T} \vec{F} = m \frac{d^2\vec{x}}{d(-t)^2} \Leftrightarrow \vec{F} = m\vec{a}$$

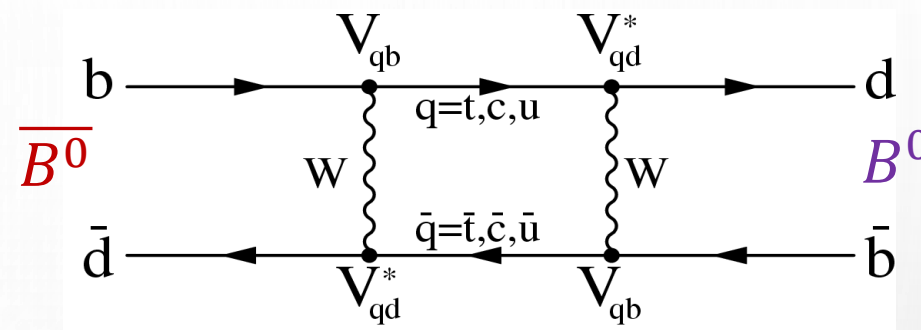
- QM: Równanie Schrodinger's ($t \rightarrow -t$): $ih \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla}^2 \psi}{2m}$

Niezmienniczość zachowana dla wektorów dualnych: $\psi \xrightarrow{T} \psi^*$

OSCYLACJE ZAPACHU

- Interferencja kwantowa z $\overline{B^0}$ i B^0 : “Czym jest cząstka?”

- Spontaniczne przejścia $\overline{B^0} \leftrightarrow B^0$



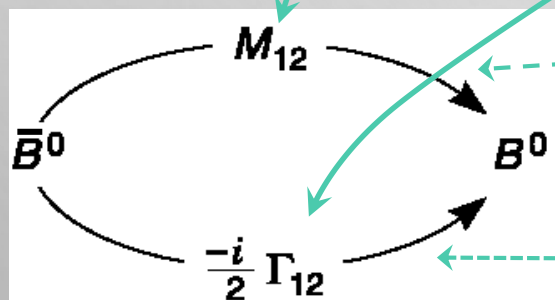
- EWOLUCJA CZASOWA B^0 i $\overline{B^0}$ OPISANA PRZEZ EFEKTYWNY HAMILTONIAN

$$i \frac{\partial}{\partial t} \psi = H \psi \quad \rightarrow \quad \psi(t) = a(t)|B^0\rangle + b(t)|\overline{B^0}\rangle \quad \equiv \quad \begin{pmatrix} a(t) \\ b(t) \end{pmatrix}$$

$$H = \underbrace{\begin{pmatrix} M & M_{12} \\ M_{12}^* & M \end{pmatrix}}_{\text{Hermitowska macierz masy}} - \frac{i}{2} \underbrace{\begin{pmatrix} \Gamma & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{12}^* & \Gamma \end{pmatrix}}_{\text{Hermitowska macierz rozpadu}}$$

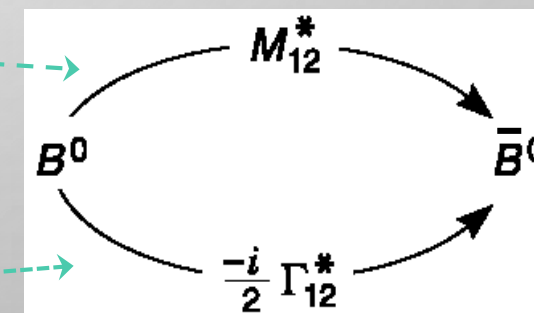
Hermitowska macierz masy

Hermitowska macierz rozpadu



M_{12} procesy $B^0 \leftrightarrow \overline{B^0}$ na drodze wymiany stanów wirtualnych (poza powłoką masy)

Γ_{12} procesy $B^0 \leftrightarrow f \leftrightarrow \overline{B^0}$ na drodze wymiany cząstek rzeczywistych $f = \pi^+ \pi^-$



$$i \frac{\partial}{\partial t} \psi(t) = \begin{pmatrix} M - \frac{i}{2} \Gamma & M_{12} - \frac{i}{2} \Gamma_{12} \\ M_{12}^* - \frac{i}{2} \Gamma_{12}^* & M - \frac{i}{2} \Gamma \end{pmatrix} \psi(t)$$

Wektory własne:

$$|B_H(t)\rangle = |B_H\rangle e^{-i\omega_+ t}$$

$$|B_L(t)\rangle = |B_L\rangle e^{-i\omega_- t}$$

B_H, B_L : Stany własne masy

$$\begin{aligned} |B_H\rangle &= p|B^0\rangle + q|\overline{B^0}\rangle \\ |B_L\rangle &= p|B^0\rangle - q|\overline{B^0}\rangle \end{aligned}$$

$B^0, \overline{B^0}$: Stany własne zapachu

Rozwiązanie problemu własnego:

$$q/p = - \sqrt{\left(M_{12}^* - \frac{i}{2} \Gamma_{12}^*\right) / \left(M_{12} - \frac{i}{2} \Gamma_{12}\right)}$$

Rozwiązanie:

$$\Rightarrow \psi(t) = \alpha |B_H(t)\rangle + \beta |B_L(t)\rangle$$

$$\omega_{\pm} = m_{\pm} - \frac{i}{2} \Gamma_{\pm} \quad \begin{cases} m_{\pm} = M \pm \frac{1}{2} \Delta m \\ \Gamma_{\pm} = \Gamma \pm \frac{1}{2} \Delta \Gamma \end{cases}$$

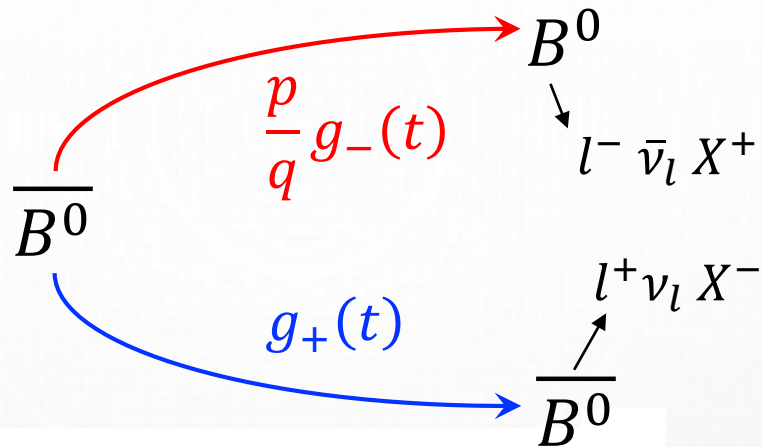
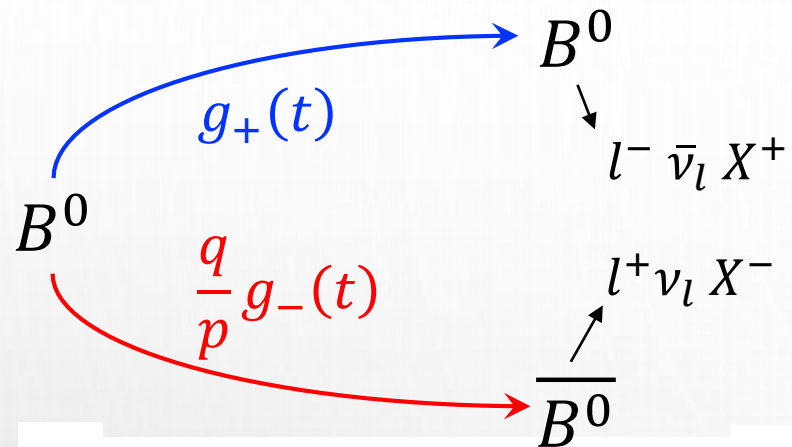
Masy

Czasy życia

$$\begin{aligned} \Delta m &= 2 \Re \sqrt{\left(M_{12} - \frac{i}{2} \Gamma_{12}\right) \left(M_{12}^* - \frac{i}{2} \Gamma_{12}^*\right)} \\ \Delta \Gamma &= 4 \Im \sqrt{\left(M_{12} - \frac{i}{2} \Gamma_{12}\right) \left(M_{12}^* - \frac{i}{2} \Gamma_{12}^*\right)} \end{aligned}$$

Przykłady

$$\begin{aligned} B^0 : \Delta \Gamma \approx 0, |q/p| &= 1 \\ B_s^0 : \Delta \Gamma / \Delta m \ll 1, |q/p| &= 1 \\ K^0 : \Delta \Gamma / \Delta m \simeq 1, |q/p| - 1 &\simeq 10^{-3} \end{aligned}$$



Możemy wyliczyć:

$$|\langle B(t) | B^0 \rangle|^2$$

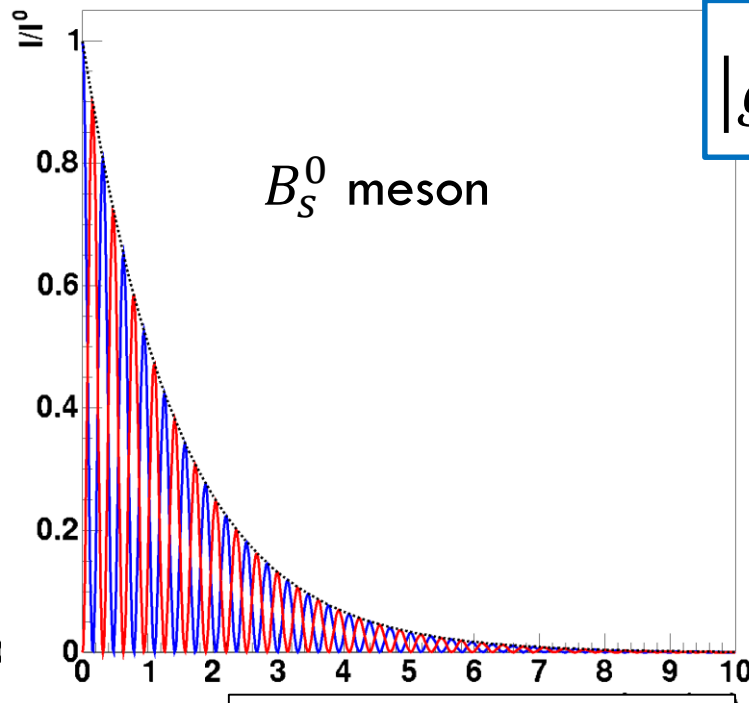
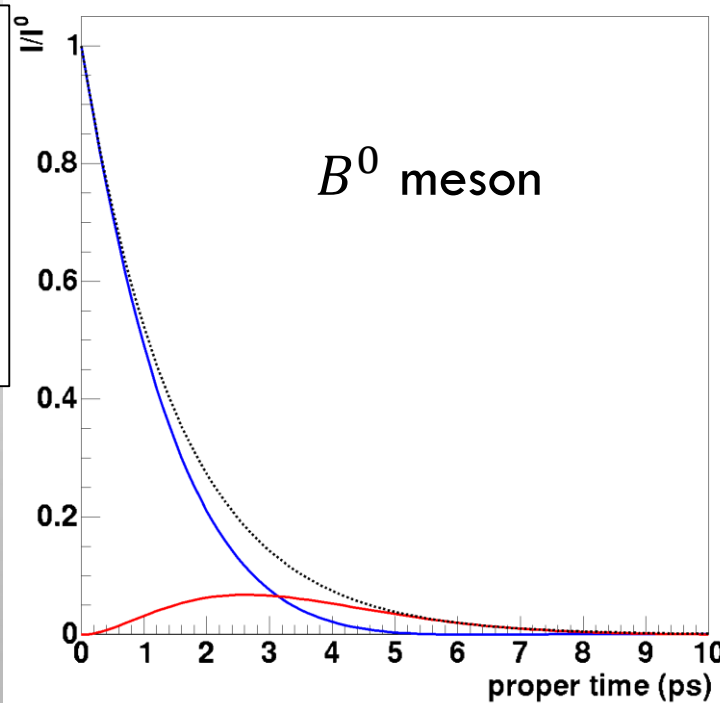
$$|\langle \bar{B}(t) | B^0 \rangle|^2$$

Dla B^0 , mamy:
 $\Delta\Gamma \sim 0, \quad |q/p| = 1$

$$|g_{\pm}(t)|^2 = \frac{e^{-\Gamma t}}{2} [1 \pm \cos(\Delta m \cdot t)]$$

Oscylacje zapachu!

Decay Probability



Decay Proper Time (ps)

