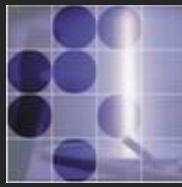


*Boštjan Golob  
UNIVERZA V LJUBLJANI/  
INSTITUT JOŽEF STEFAN*



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za matematiko in fiziko  
Oddelek za fiziko

Institut "Jožef Stefan"

## STANDARDNI MODEL

## ISKANJE PROCESOV IZVEN SM

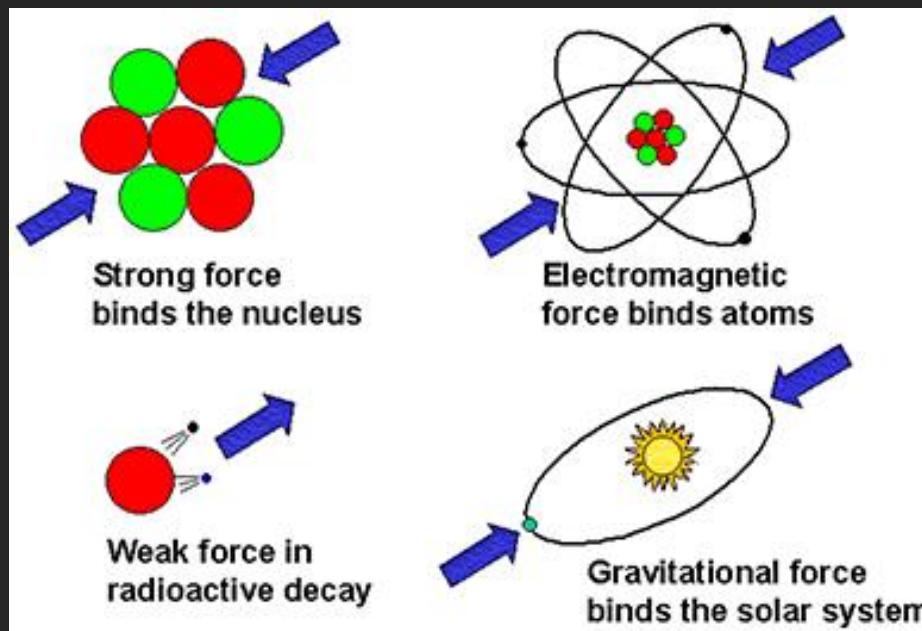
## ENERGIJSKO OBZORJE

## OBZORJE NATANČNOSTI

# BELLE II INTERNATIONAL MASTERCLASSES 2021

## FIZIKA DELCEV:

STANDARDNI MODEL (SM) INTERAKCIJ MED OSNOVNIMI DELCI (MOČNA, ELEKTROMAGNETNA, ŠIBKA, GRAVITACIJSKA):



C. SCHWARZ, FORCES AND INTERACTIONS, IOP PUBLISHING

FIZIKA DELCEV SE UKVARJA Z ODKRIVANJEM IN MERJENJEM  
LASTNOSTI OSNOVNIH SIL (=INTERAKCIJ) V NARAVI

## OSNOVNI DELCI:

LASTNOSTI INTERAKCIJ ODKRIVAMO S ŠTUDIJEM PROCESOV MED OSNOVNIMI DELCI

POJEM OSNOVNIH DELCEV SE JE SPREMINJAL SKOZI ZGODOVINO ČLOVEŠKEGA RAZISKOVALNEGA DELOVANJA, PREDVSEM PA Z EKSPERIMENTALNIMI ZMOGLJIVOSTMI

EMPEDOKEL,  
5. ST. P.N.ŠT.

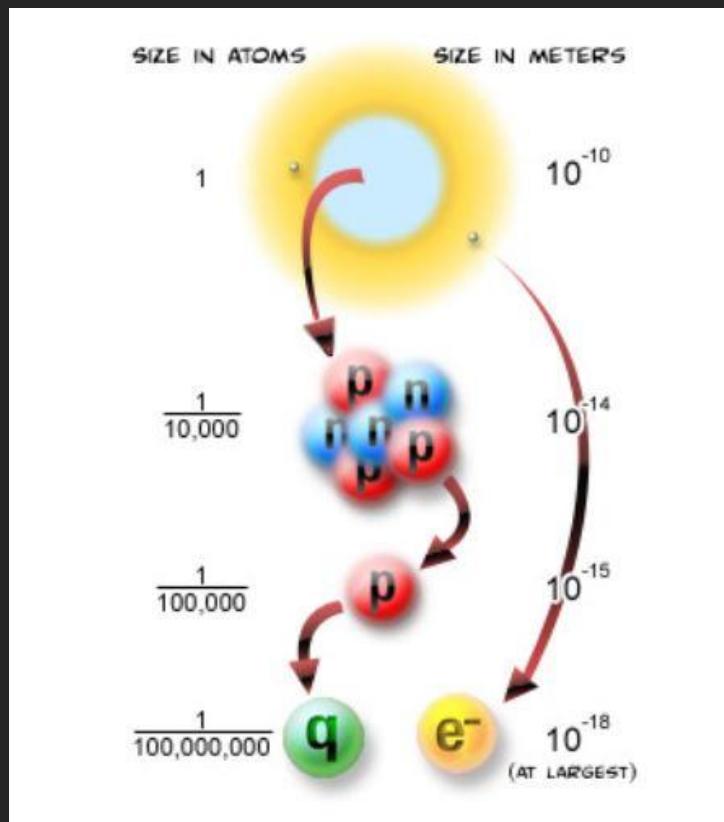


## OSNOVNI DELCI:

LASTNOSTI INTERAKCIJ ODKRIVAMO S ŠTUDIJEM PROCESOV MED OSNOVNIMI DELCI

POJEM OSNOVNIH DELCEV SE JE SPREMINJAL SKOZI ZGODOVINO ČLOVEŠKEGA RAZISKOVALNEGA DELOVANJA, PREDVSEM PA Z EKSPERIMENTALNIMI ZMOGLJIVOSTMI

DANDANES...



## OSNOVNI DELCI:

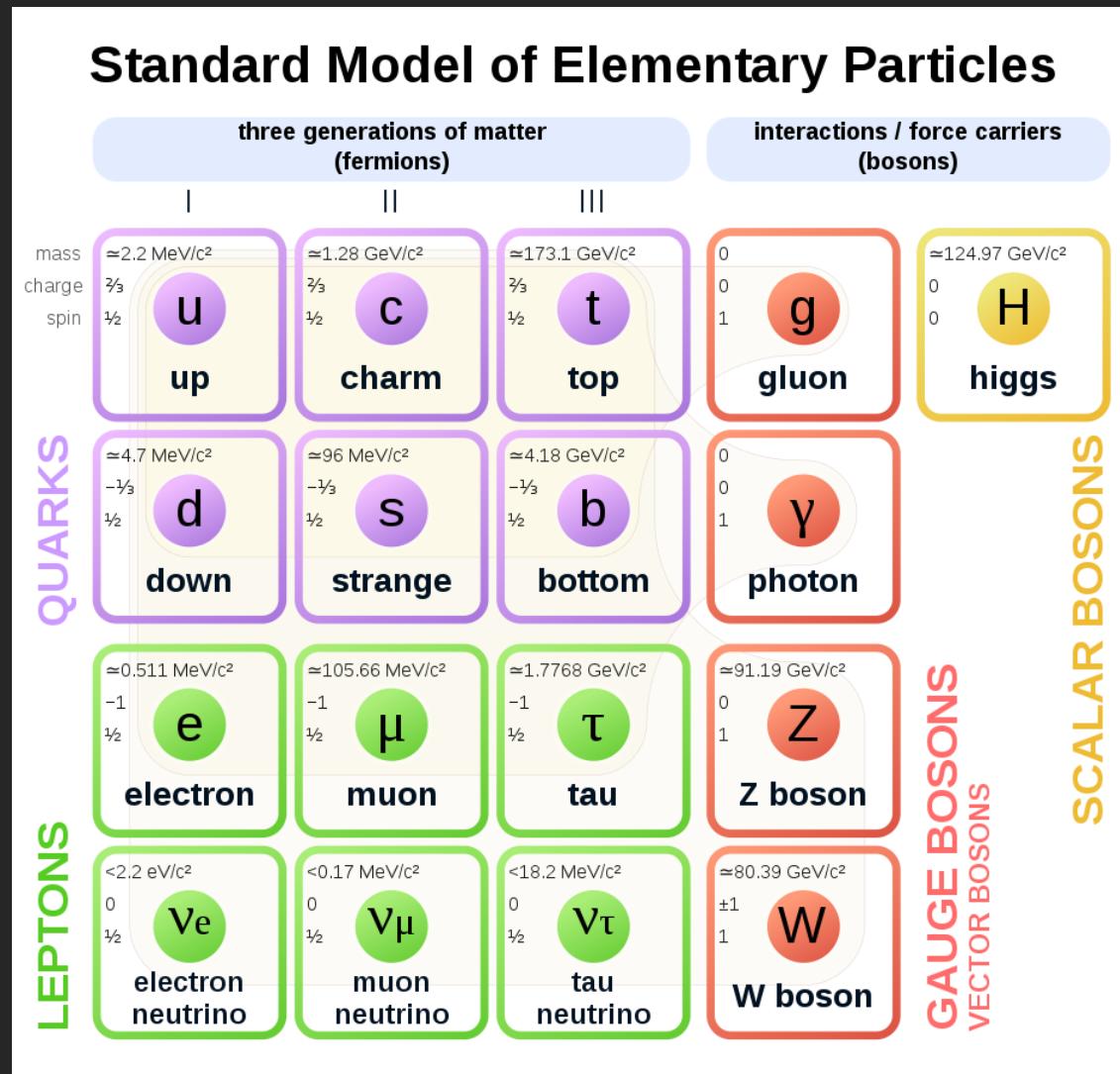
LASTNOSTI INTERAKCIJ ODKRIVAMO S ŠTUDIJEM PROCESOV MED OSNOVNIMI DELCI

POJEM OSNOVNIH DELCEV SE JE SPREMINJAL SKOZI ZGODOVINO ČLOVEŠKEGA RAZISKOVALNEGA DELOVANJA, PREDVSEM PA Z EKSPERIMENTALNIMI ZMOGLJIVOSTMI

DANDANES...

S SODOBNIMI POSPEŠEVALNIKI DELCEV UGOTAVLJAMO,  
KAJ SO (DANDANES) OSNOVNI DELCI

# OSNOVNI DELCI:



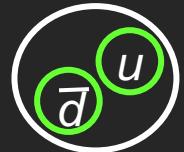
## OSNOVNI DELCI:

KVARKI V NARAVI NE NASTOPAJO PROSTI; SESTAVLJAJO TEŽJE DELCE,  
HADRONE



= PROTON

$$|p\rangle = |u(+2/3e_0)u(+2/3e_0)d(-1/3e_0)\rangle$$

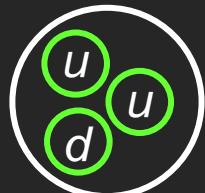


= PION

$$|\pi^+\rangle = |u(+2/3e_0)\bar{d}(+1/3e_0)\rangle$$

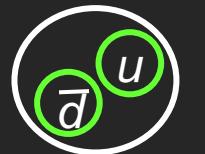
## OSNOVNI DELCI:

KVARKI V NARAVI NE NASTOPAJO PROSTI; SESTAVLJAJO TEŽJE DELCE, HADRONE



= PROTON

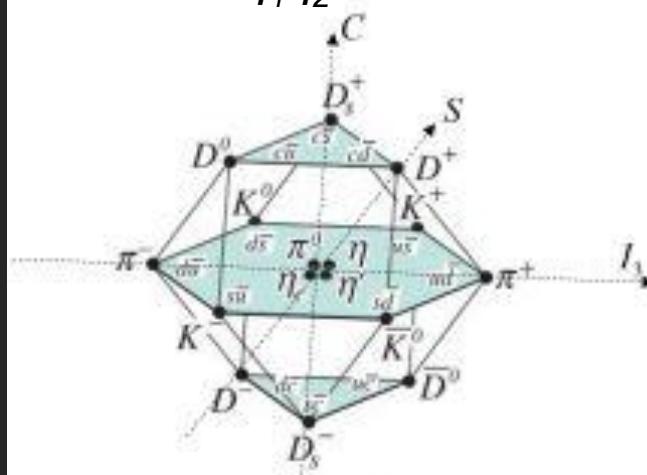
$$|p\rangle = |u(+2/3e_0)u(+2/3e_0)d(-1/3e_0)\rangle$$



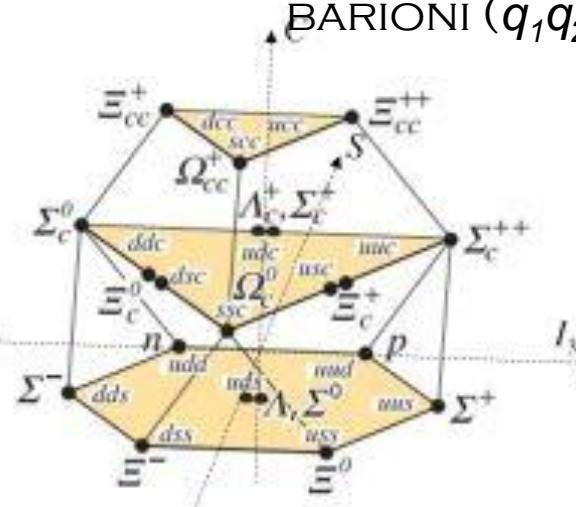
= PION

$$|\pi^+\rangle = |u(+2/3e_0)\bar{d}(+1/3e_0)\rangle$$

MEZONI ( $q_1\bar{q}_2$ )



BARIONI ( $q_1q_2q_3$ )



„PERIODNI  
SISTEM“  
HADRONOV

# ODPRTA VPRAŠANJA V FIZIKI DELCEV

SM INTERAKCIJ MED OSNOVNIMI DELCI IMA VEČ PROBLEMOV

NPR.:

**ASIMETRIJA MED SNOVJO/ANTI-SNOVJO:** OPAZLJIVO VESOLJE -  
POPOLNA PREVLADA SNOVI NAD ANTI-SNOVJO;  
EDEN OD (SAHAROVIH) POGOJEV ZA TAK RAZVOJ VESOLJA  
- KRŠITEV SIMETRIJE CP;  
IZMERJENA KRŠITEV SIMETRIJE CP  $\sim 10$  VELIK. REDOV  
(10000000000 — KRAT !!)  
PREMAJHNA ZA POJASNILO ASIMETRIJE V VESOLJU



# ODPRTA VPRAŠANJA V FIZIKI DELCEV

SM INTERAKCIJ MED OSNOVNIMI DELCI IMA VEČ PROBLEMOV

NPR.:

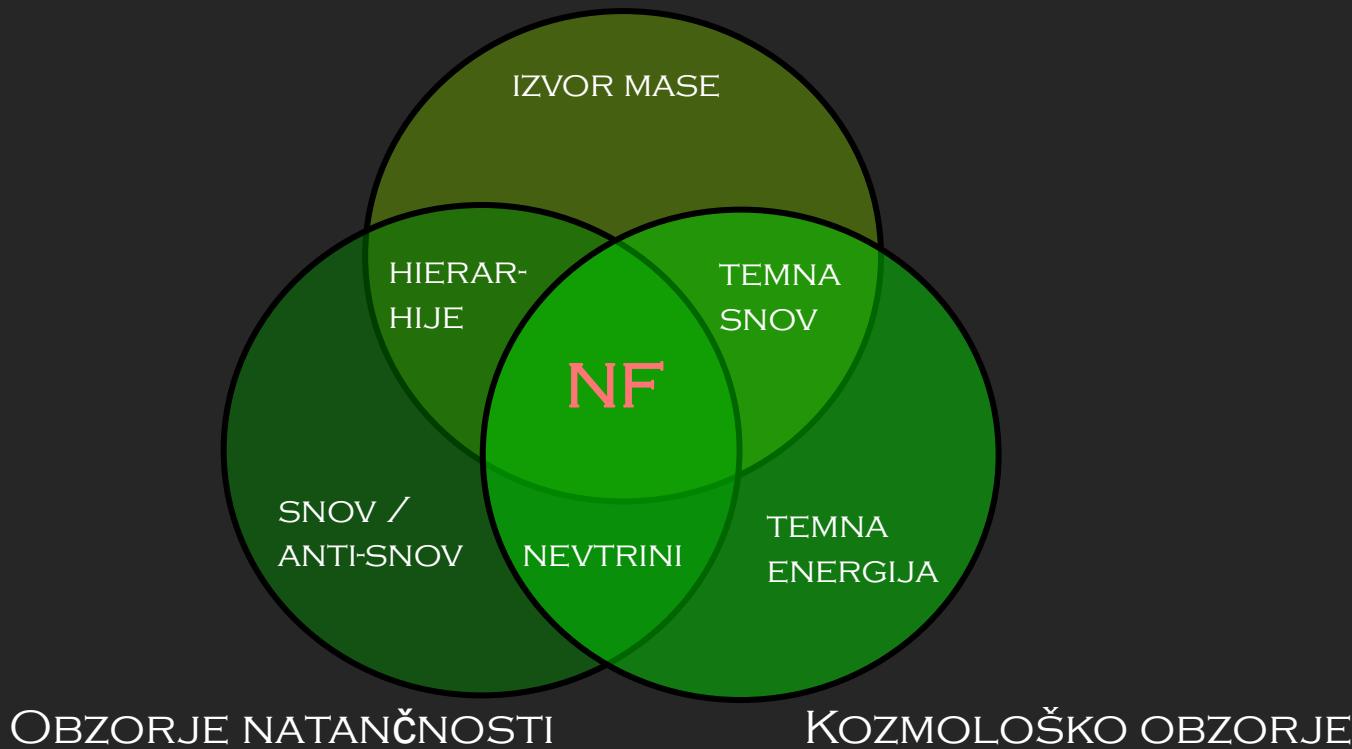
**ASIMETRIJA MED SNOVJO/ANTI-SNOVJO:** OPAZLJIVO VESOLJE -  
POPOLNA PREVLADA SNOVI NAD ANTI-SNOVJO;  
EDEN OD (SAHAROVIH) POGOJEV ZA TAK RAZVOJ VESOLJA  
- KRŠITEV SIMETRIJE CP;  
IZMERJENA KRŠITEV SIMETRIJE CP  $\sim 10$  VELIK. REDOV  
(10000000000 — KRAT !!)  
PREMAJHNA ZA POJASNILO ASIMETRIJE V VESOLJU

VEČ PREDLAGANIH (DOSLEJ NEPOTRJENIH) REŠITEV:  
SUPERSIMETRIČNE TEORIJE, DODATNE DIMENZIJE...  
→ “NOVA FIZIKA” (NF)

# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

TROJNI PRISTOP

ENERGIJSKO OBZORJE



ODKRITJE, PREDVSEM PA INTERPRETACIJA NF BI  
PREDSTAVLJALO VELIK ZNANSTVENI PREBOJ

# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

TROJNI PRISTOP

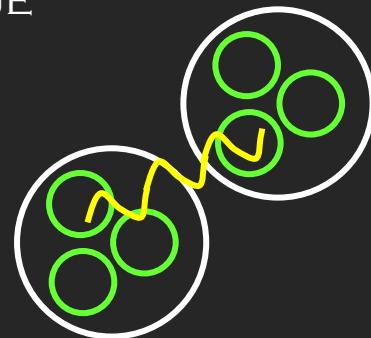
ENERGIJSKO OBZORJE

$$\xrightarrow{p, E/2} \xleftarrow{p, E/2}$$

# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

TROJNI PRISTOP

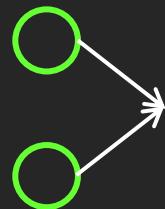
ENERGIJSKO OBZORJE



# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

TROJNI PRISTOP

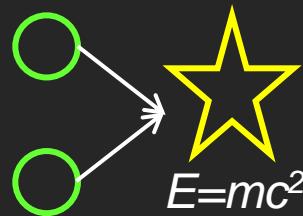
ENERGIJSKO OBZORJE



# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

TROJNI PRISTOP

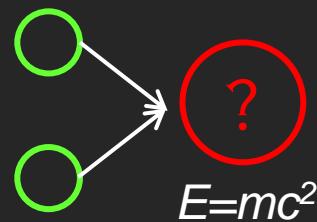
ENERGIJSKO OBZORJE



# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

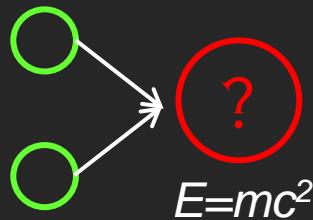
TROJNI PRISTOP

ENERGIJSKO OBZORJE

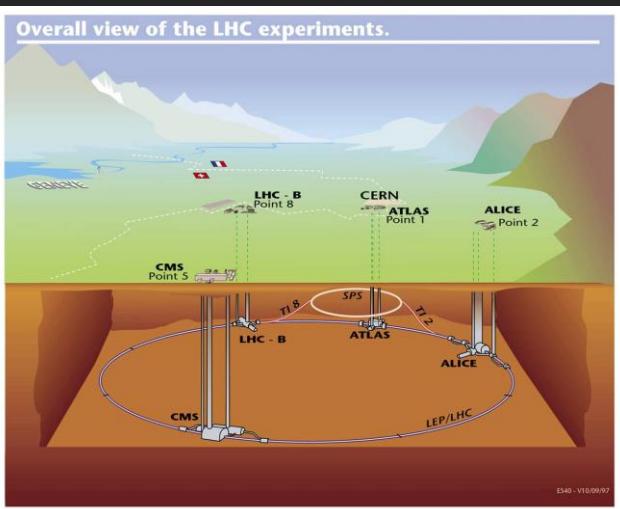


# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

## TROJNI PRISTOP ENERGIJSKO OBZORJE



## PRODUKCIJA DOSLEJ NEZNANIH DELCEV IN PROCESOV PRI NAJVIŠJIH DOSEGLJIVIH ENERGIJAH



LARGE HADRON  
COLLIDER

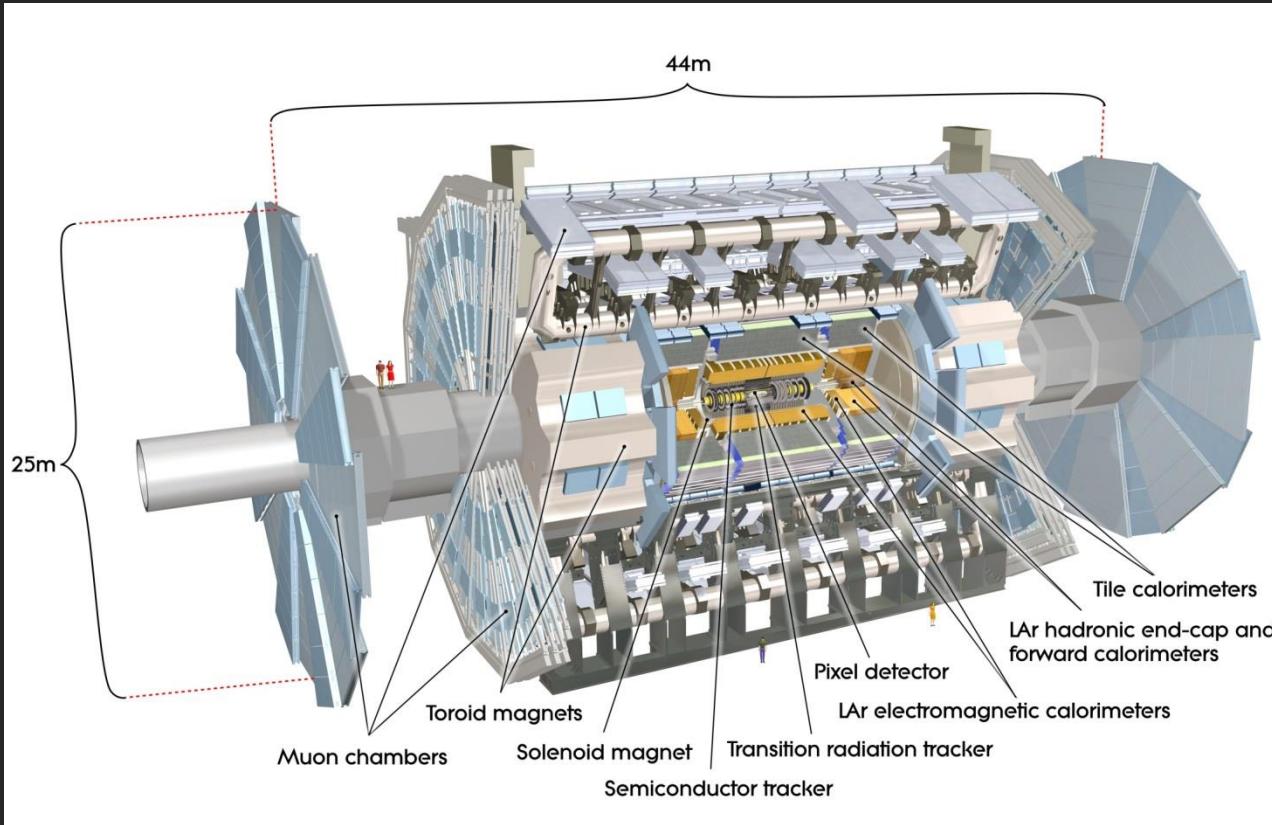
$$mc^2 = 13 \text{ TeV}$$
$$T = \text{TERA} = 10^{12}$$

GRUČA  $p$  V LHCIMA  
ENERGIJO KOT 1,5 T  
AVTO PRI 45 KM/H



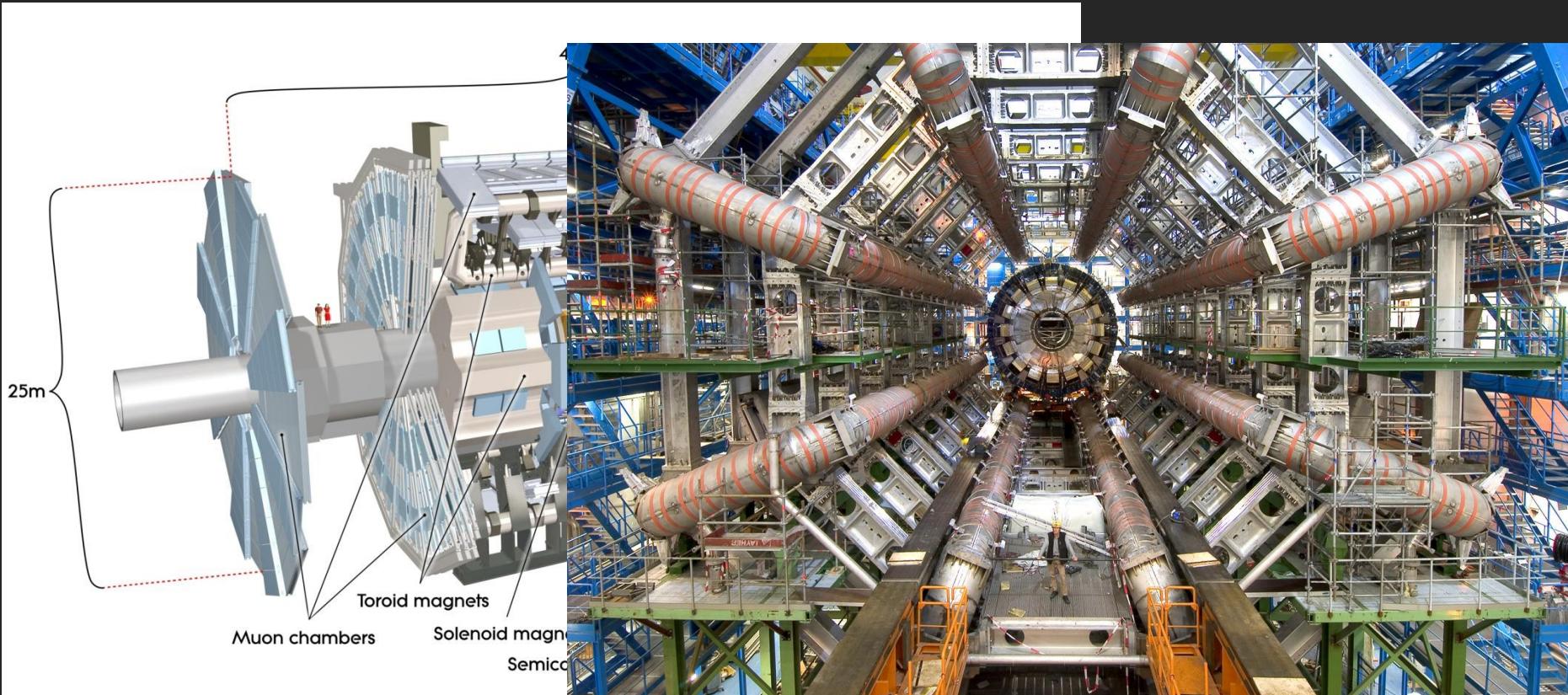
# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

## ENERGIJSKO OBZORJE



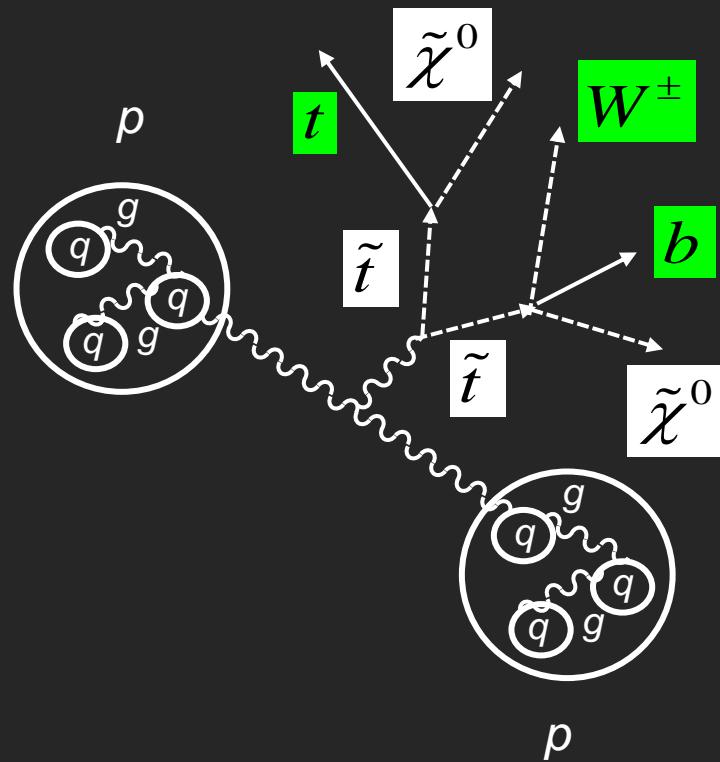
# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

## ENERGIJSKO OBZORJE

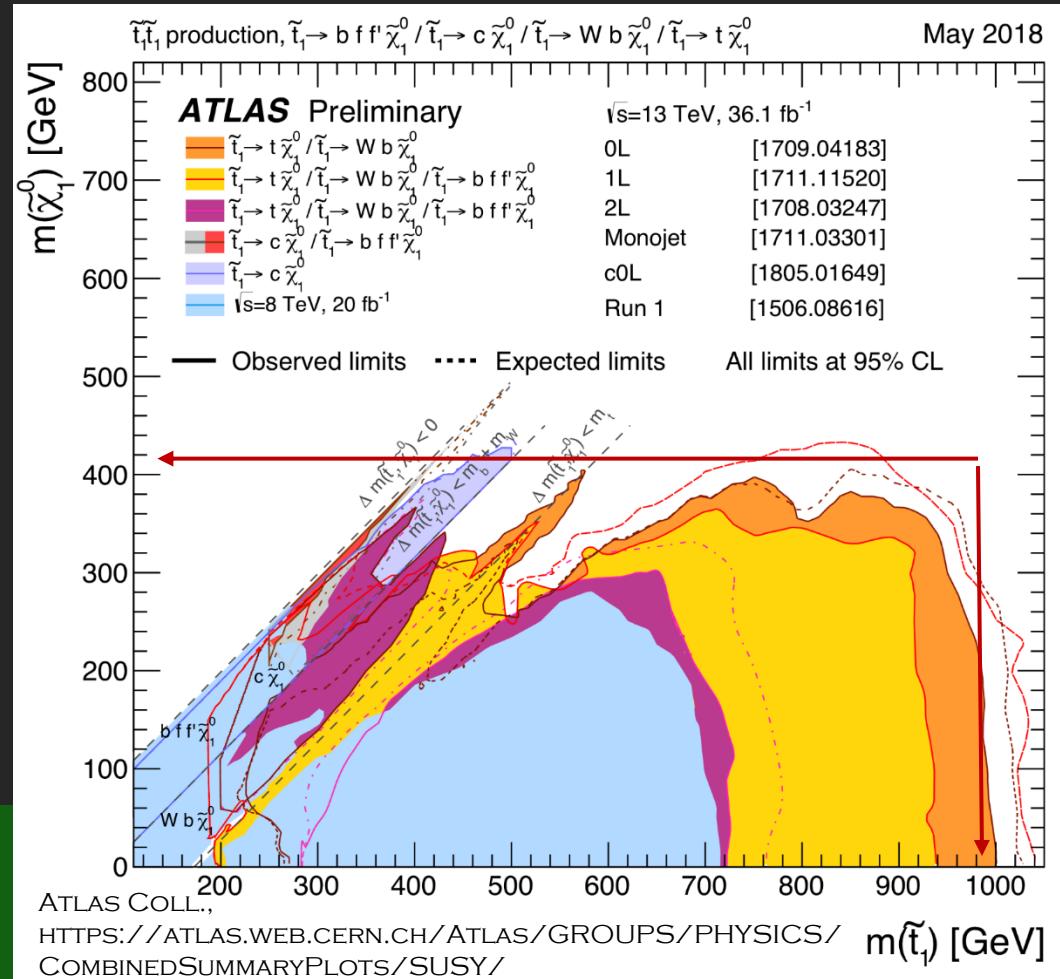


# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

## ENERGIJSKO OBZORJE



ZAENKRAT NI OPAŽENIH NOVIH  
DELCEV Z  
 $M \lesssim \sim 500 \text{ GeV}/c^2 - 1 \text{ TeV}/c^2$



# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

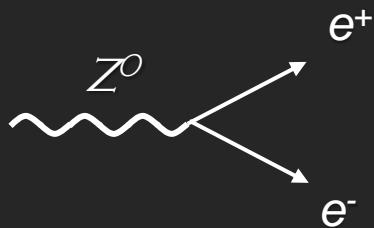
## OBZORJE NATANČNOSTI

... JE PREPROSTA:

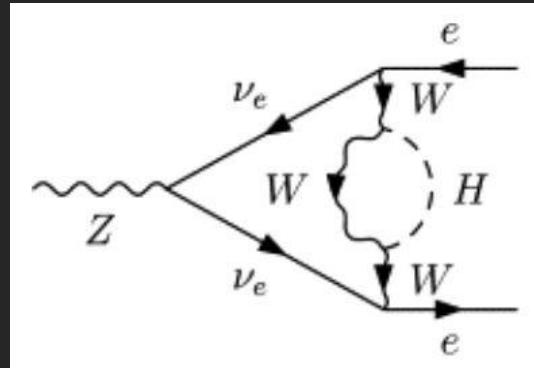
Z ELO NATANČNO IZMERITI (REDKE) PROCESE IN PRIMERJATI REZULTATE Z Z ELO NATANČNIMI NAPOVEDMI V OKVIRU SM

ŠE NEODKRITI DELCI LAHKO PRISPEVAJO K ZNANIM PROCESOM  
(ZGODOVINSKI PRIMER:  $Z^0 \rightarrow e^+e^- = F(M_H)$ ):

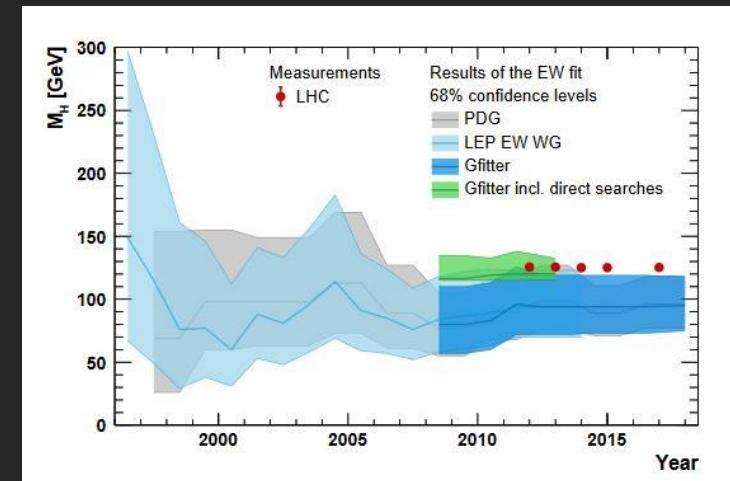
OSNOVNI RED



VIŠJI RED



+ DRUGE SPREMENLJIVKE



J. HALLER ET AL., EUR. PHYS. J. C78, 675 (2018)

... HUDIČ JE V PODROBNOSTIH...: „Z ELO“ NATANČNO ...!

# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

OBZORJE NATANČNOSTI

REDKI PROCESI:

$$\text{ZABELEŽENI} \quad = \quad \text{LUMINOZNOST} \quad \times \quad \text{VERJETNOST ZA} \quad \times \quad \text{IZKORISTEK} \\ \text{PROCESI} \qquad \qquad \qquad \text{POSPEŠEVALNIKA} \qquad \qquad \text{PROCES} \qquad \qquad \qquad \text{REKONSTRUKCIJE}$$

# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

OBZORJE NATANČNOSTI

REDKI PROCESI:

$$\text{ZABELEŽENI PROCESI} = \text{LUMINOZNOST POSPEŠEVALNIKA} \times \text{VERJETNOST ZA PROCES} \times \text{IZKORISTEK REKONSTRUKCIJE}$$

NATANČNOST MERITVE:

$$\left( \frac{\sigma(a)}{a} \right)^2 = \frac{1}{N_{\text{det}}} + \left( \frac{\sigma_{\text{syst}}}{a} \right)^2$$

# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

OBZORJE NATANČNOSTI

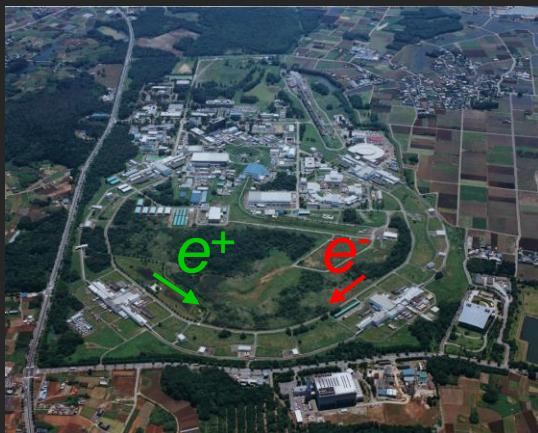
REDKI PROCESI:

$$\text{ZABELEŽENI PROCESI} = \text{LUMINOZNOST POSPEŠEVALNIKA} \times \text{VERJETNOST ZA PROCES} \times \text{IZKORISTEK REKONSTRUKCIJE}$$

NATANČNOST MERITVE:

$$\left( \frac{\sigma(a)}{a} \right)^2 = \frac{1}{N_{\text{det}}} + \left( \frac{\sigma_{\text{syst}}}{a} \right)^2$$

TRKALNIK KEKB IN DETEKTOR BELLE (1999-2010):  $\sim 7 \cdot 10^8 e^+e^- \rightarrow B\bar{B}$



# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

OBZORJE NATANČNOSTI

REDKI PROCESI:

$$\text{ZABELEŽENI PROCESI} \quad = \quad \text{LUMINOZNOST POSPEŠEVALNIKA} \times \text{VERJETNOST ZA PROCES} \times \text{IZKORISTEK REKONSTRUKCIJE}$$

NATANČNOST MERITVE:

$$\left( \frac{\sigma(a)}{a} \right)^2 = \frac{1}{N_{\text{det}}} + \left( \frac{\sigma_{\text{syst}}}{a} \right)^2$$

PROCES	$\sigma(BR)/BR$
$BR(B \rightarrow X) \sim \mathcal{O}(10^{-7})$	OPAZIMO
$BR(B \rightarrow X) \sim \mathcal{O}(10^{-5})$	$\mathcal{O}(10\%)$
$BR(B \rightarrow Y_{\bar{v}}) \sim \mathcal{O}(10^{-5})$	OPAZIMO
$BR(B \rightarrow Y_{\bar{v}}) \sim \mathcal{O}(10^{-3})$	$\mathcal{O}(10\%)$

# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF

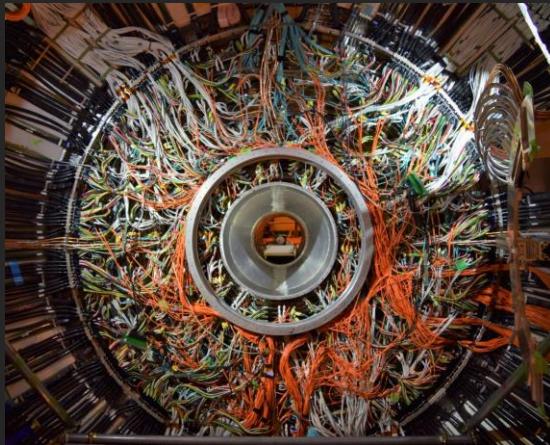
OBZORJE NATANČNOSTI

REDKI PROCESI:

$$\text{ZABELEŽENI PROCESI} \quad = \quad \text{LUMINOZNOST POSPEŠEVALNIKA} \times \text{VERJETNOST ZA PROCES} \times \text{IZKORISTEK REKONSTRUKCIJE}$$

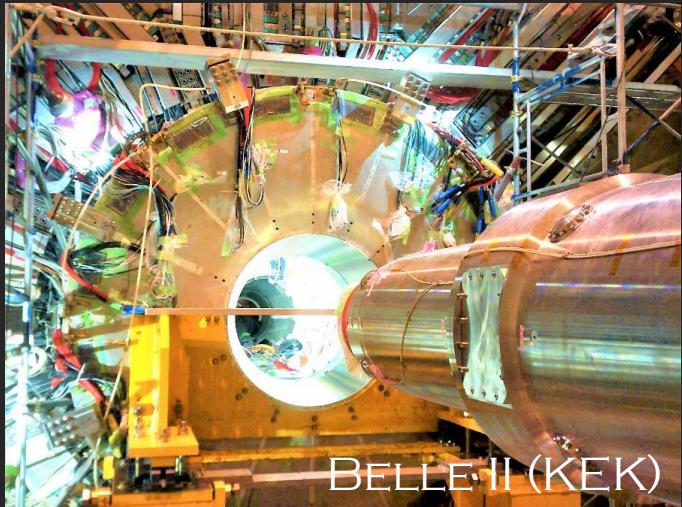
NATANČNOST MERITVE:

$$\left( \frac{\sigma(a)}{a} \right)^2 = \frac{1}{N_{\text{det}}} + \left( \frac{\sigma_{\text{syst}}}{a} \right)^2$$

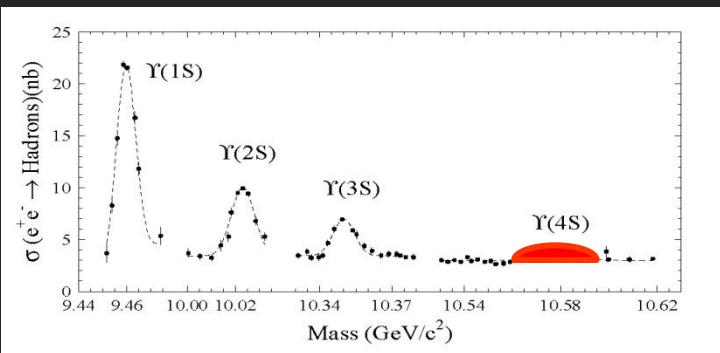


TRKALNIK SUPERKEKB IN DETEKTOR BELLE II (2018 - ):  $\sim 40x \mathcal{L}$ ,  $\sim 50x N(\overline{B}\overline{B})$   
+ IZBOLJŠAVE EKSP. METOD ( $\sigma_{\text{syst}}$ )  $\Rightarrow$  IZBOLJŠANA  $\sigma(a)/a$  ZA VELIK. RED

# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF (SUPER)KEKB – TOVARNA MEZONOV B



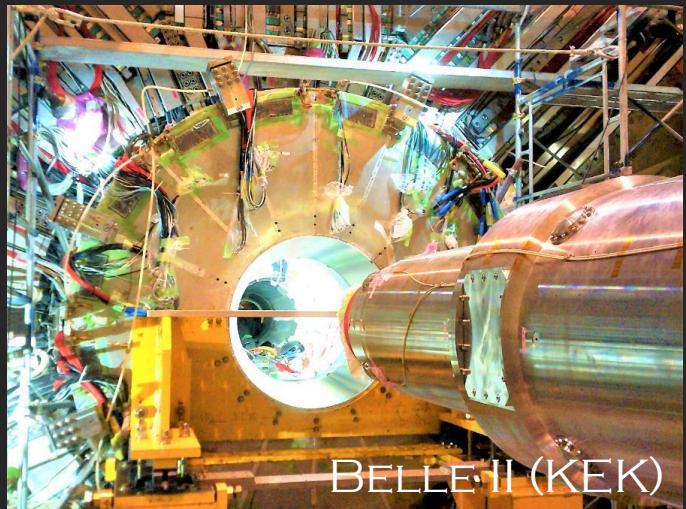
OBZORJE NATANČNOSTI  
ENERGIJA:



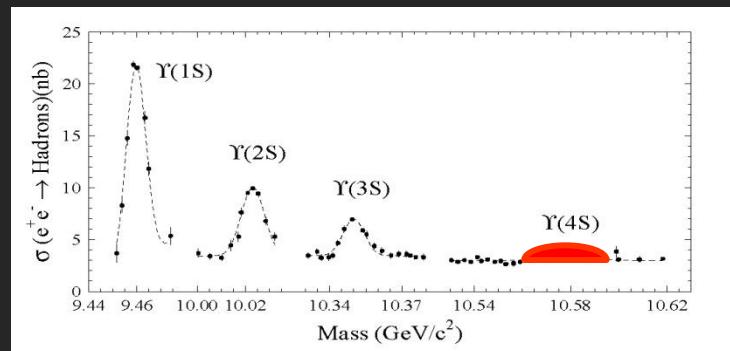
$$\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$$



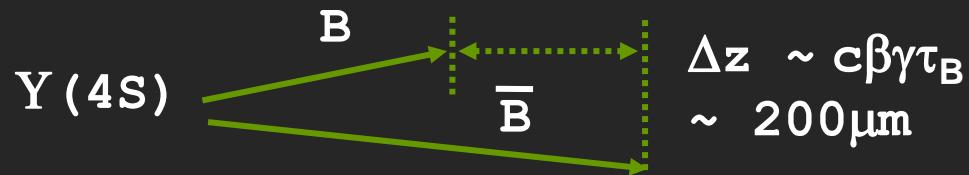
# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF (SUPER)KEKB – TOVARNA MEZONOV B



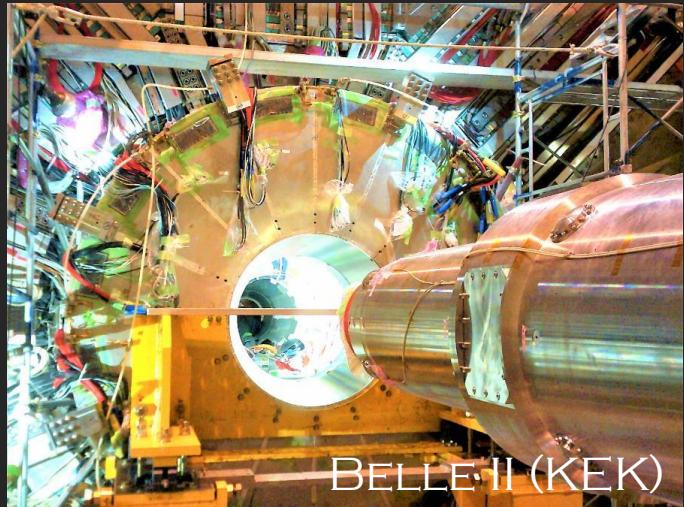
OBZORJE NATANČNOSTI  
ENERGIJA:



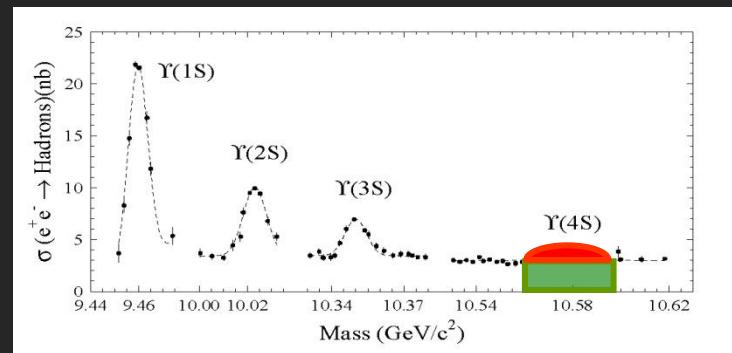
$$\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$$



# EKSPERIMENTALNI PRISTOP K ODKRIVANJU NF (SUPER)KEKB – TOVARNA MEZONOV B



OBZORJE NATANČNOSTI  
ENERGIJA:

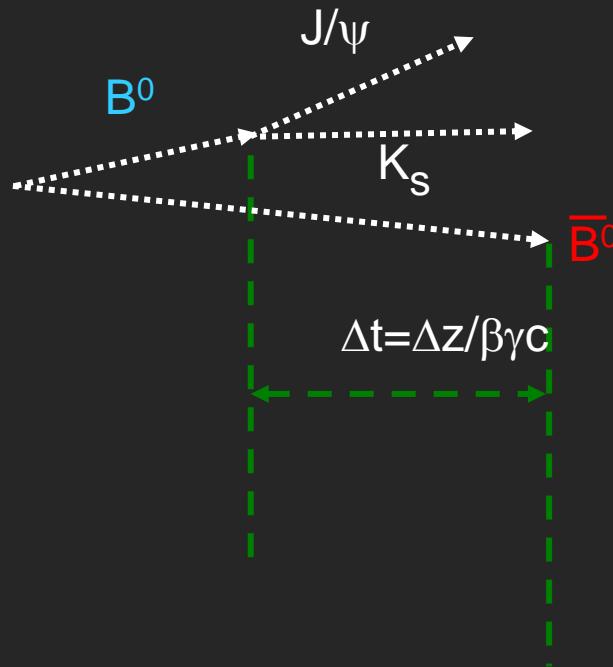


$$e^+ e^- \rightarrow q \bar{q}, \ell^+ \ell^- \\ (q=u,d,s,c; \ell=e,\mu,\tau)$$

NATANČNE MERITVE  
PROCESOV Z MEZONI B, D, ...

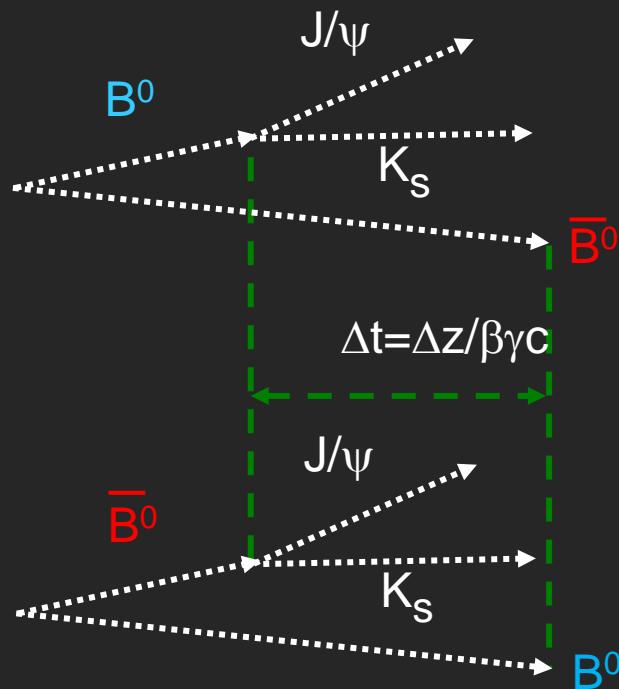
# ASIMETRIJA BELLE (II)

RAZLIKA V POTEKU PROCESOV Z  
DELCI IN NJIHOVIMI ANTI-DELCI  
**ASIMETRIJA CP**



# ASIMETRIJA BELLE (II)

RAZLIKA V POTEKU PROCESOV Z  
DELCI IN NJIHOVIMI ANTI-DELCI  
**ASIMETRIJA CP**



PROCESI Z DELCI POTEKAJO MALENKOST  
DRUGAČE KOT PROCESI Z ANTI-DELCI

# ASIMETRIJA

## BELLE (II)



M. KOBAYASHI T. MASKAWA

KEKB と Belle に携わった全ての  
人とともに、アップグレード計画の  
成功を祈念しつつ。

2008年10月9日

小林 錦



# ASIMETRIJA

## BELLE (II)



M. KOBAYASHI T. MASKAWA

KEKB と Belle に携わった全ての人とともに、アップグレード計画の成功を祈念しつつ。

2008年10月9日

小林 錦

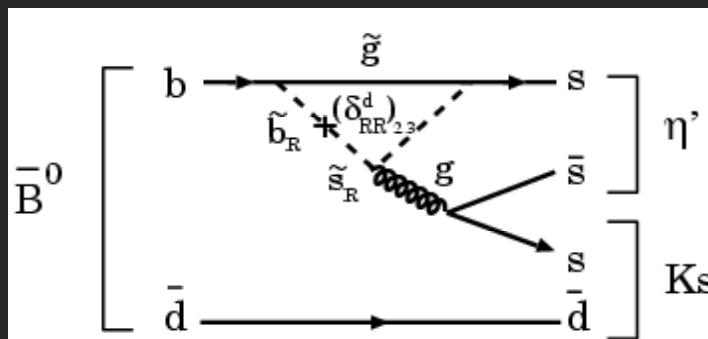


### A ČE SE VRNEMO NA ZAČETEK:

IZMERJENA KRŠITEV SIMETRIJE CP ~ 10 VELIK. REDOV

PREMAJHNA ZA POJASNILLO ASIMETRIJE V VESOLJU

⇒ OBSTAJATI MORajo ŠE NEZNANI PROCESI, PRI KATERIH JE SIMETRIJA CP DODATNO KRŠENA



V NASLEDNJIH LETIH BOMO Z BELLE II  
IZMERILI NATANČNEJE ŠE REDKEJŠE  
PROCESE

# ASIMETRIJA

- **SM** INTERAKCIJ MED OSNOVNIMI DELCI JE ENA EKSPERIMENTALNO NAJBOLJE PREVERJENIH FIZIKALNIH TEORIJ

# ASIMETRIJA

- **SM** INTERAKCIJ MED OSNOVNIMI DELCI JE ENA EKSPERIMENTALNO NAJBOLJE PREVERJENIH FIZIKALNIH TEORIJ
- IMA POMANJKLJIVOSTI, KI NEDVOUMNO KAŽEJO NA PRISOTNOST **NF**

# ASIMETRIJA

- **SM** INTERAKCIJ MED OSNOVNIMI DELCI JE ENA EKSPERIMENTALNO NAJBOLJE PREVERJENIH FIZIKALNIH TEORIJ
- IMA POMANJKLJIVOSTI, KI NEDVOUMNO KAŽEJO NA PRISOTNOST **NF**
- ENERGIJSKO OBZORJE, OBZORJE NATANČNOSTI, KOZMOLOŠKO OBZORJE  
SLO SODELOVANJE: (ATLAS) (BELL II) (P. AUGER)

# ASIMETRIJA

- SM INTERAKCIJ MED OSNOVNIMI DELCI JE ENA EKSPERIMENTALNO NAJBOLJE PREVERJENIH FIZIKALNIH TEORIJ
- IMA POMANJKLJIVOSTI, KI NEDVOUMNO KAŽEJO NA PRISOTNOST NF
- ENERGIJSKO OBZORJE, OBZORJE NATANČNOSTI, KOZMOLOŠKO OBZORJE  
SLO SODELOVANJE: (ATLAS) (BELLE II) (P. AUGER)
- MLADI RAZISKOVALCI DOBRODOŠLI