

GR 1915-2015

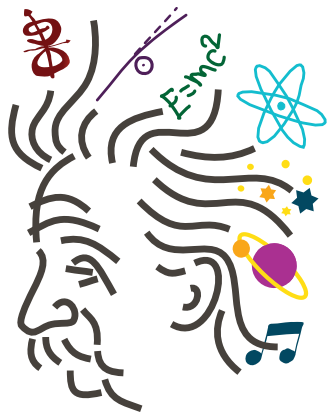
# EKSPERIMENTALNE POTVRDE OPŠTE TEORIJE RELATIVNOSTI

100 godina Opšte teorije relativnosti

23. jun 2015.

Duško Latas

Univerzitet u Beogradu  
**Fizički fakultet**



# UVOD

- Opšta teorije relativnosti (OTR) je jedan od najvećih trijumfa ljudskog uma.

# UVOD

- Opšta teorije relativnosti (OTR) je jedan od najvećih trijumfa ljudskog uma.
- Kada je pre sto godina formulsana, u prvom planu je bila njena logička usaglašenost.

# UVOD

- Opšta teorije relativnosti (OTR) je jedan od najvećih trijumfa ljudskog uma.
- Kada je pre sto godina formulsana, u prvom planu je bila njena logička usaglašenost.
- Iz OTR slede predviđanja koja se proveravaju u eksperimentima.

# ODNOS OTR I EKSPERIMENTA

Četiri faze:

# ODNOS OTR I EKSPERIMENTA

Četiri faze:

→ Nastanak (1887-1929)

# ODNOS OTR I EKSPERIMENTA

Četiri faze:

- Nastanak (1887-1929)
- Hibernacija (1930-1960)

# ODNOS OTR I EKSPERIMENTA

Četiri faze:

- Nastanak (1887-1929)
- Hibernacija (1930-1960)
- Zlatno doba (1960-1980)



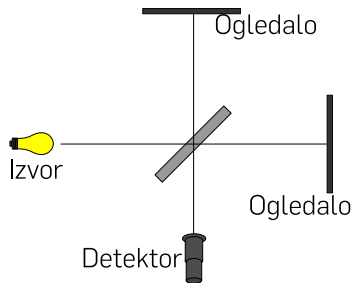
# ODNOS OTR I EKSPERIMENTA

Četiri faze:

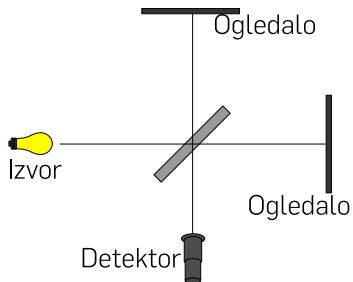
- Nastanak (1887-1929)
- Hibernacija (1930-1960)
- Zlatno doba (1960-1980)
- Traganje za jakim gravitacionim poljima (1980- )

# EKSPERIMENTALNE OSNOVE OTR

## MAJKELSON-MORLIJEV EKSPERIMENT

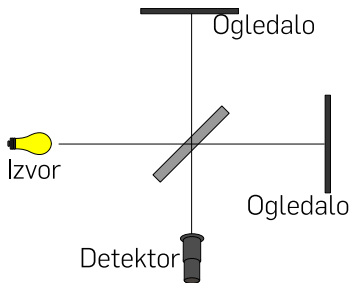


# MAJKELSON-MORLIJEV EKSPERIMENT



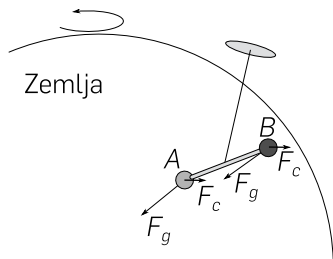
→ pokazao da svi inercijalni posmatrači mere istu brzinu svetlosti;

# MAJKELSON-MORLIJEV EKSPERIMENT

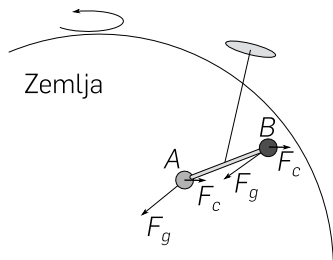


- pokazao da svi inercijalni posmatrači mere istu brzinu svetlosti;
- bio je presudan za formulisanje Specijalne teorije relativnosti 1905. godine i uvođenje prostor-vremena.

## ETVEŠOV EKSPERIMENT

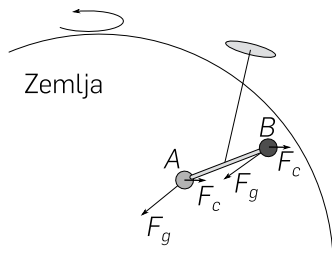


## ETVEŠOV EKSPERIMENT



→ pokazao da je razlika  
inercijalne i gravitacione  
mase manja od  $10^{-9}$ ;

## ETVEŠOV EKSPERIMENT



- pokazao da je razlika inercijalne i gravitacione mase manja od  $10^{-9}$ ;
- Ajnštajn ga je koristio za formuaciju principa ekvivalencije.



# AJNŠTAJNOV PRINCIP EKVIVALENCIJE

Tri različite eksperimentalne činjenice:

# AJNŠTAJNOV PRINCIP EKVIVALENCIJE

Tri različite eksperimentalne činjenice:

→ Slabi princip ekvivalencije.

# AJNŠTAJNOV PRINCIP EKVIVALENCIJE

Tri različite eksperimentalne činjenice:

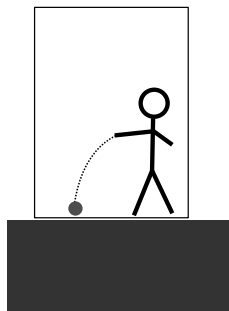
- Slabi princip ekvivalencije.
- Lokalna Lorencova invarijantnost.

# AJNŠTAJNOV PRINCIP EKVIVALENCIJE

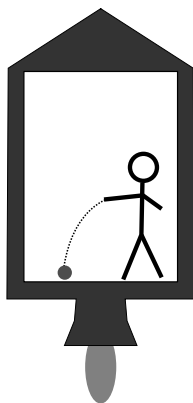
Tri različite eksperimentalne činjenice:

- Slabi princip ekvivalencije.
- Lokalna Lorencova invarijantnost.
- Invarijantnost lokalnog položaja.

## SLABI PRINCIP EKVIVALENCIJE

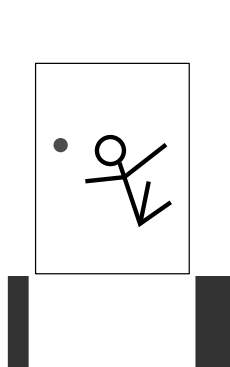


Gravitaciono polje

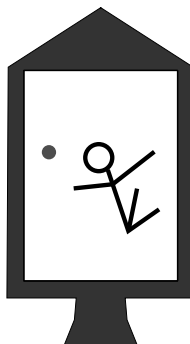


Ubrzano kretanje

## SLABI PRINCIP EKVIVALENCIJE



Slobodan pad



Ravnomerno kretanje

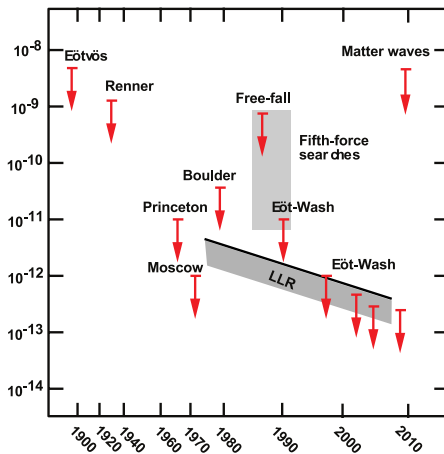
# SLABI PRINCIP EKVIVALENCIJE

Univerzalnost slobodnog pada:

# SLABI PRINCIP EKVIVALENCIJE

Univerzalnost slobodnog pada:

$$\eta = 2 \frac{\frac{m_i^A}{m_g^A} - \frac{m_i^B}{m_g^B}}{\frac{m_i^A}{m_g^A} + \frac{m_i^B}{m_g^B}}$$





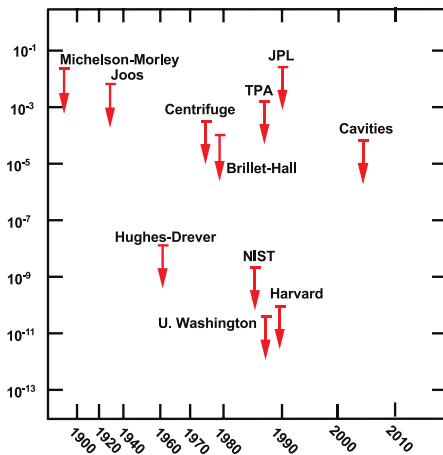
# LOKALNA LORENCOVA INVARIJANTNOST

U lokalno padajućem sistemu, važi specijalna teorija relativnosti:

# LOKALNA LORENCOVA INVARIJANTNOST

U lokalno padajućem sistemu, važi specijalna teorija relativnosti:

$$\delta = \frac{c_{\text{exp}}}{c_{\text{th}}} - 1$$

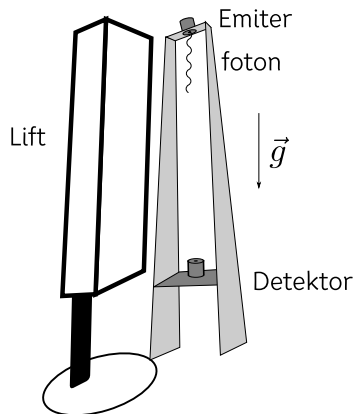


# INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA

Gravitacioni pomak (crveni ili plavi):

## INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA

Gravitacioni pomak (crveni ili plavi):

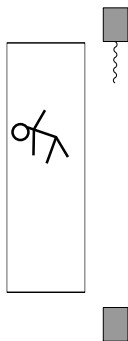


# INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA

Gravitacioni pomak (crveni ili plavi):

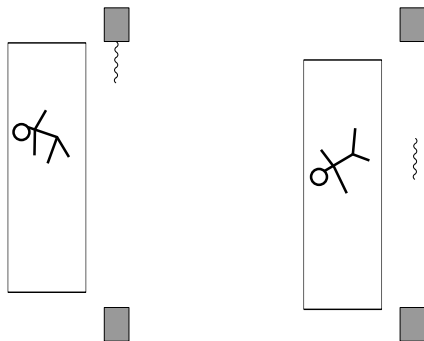
# INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA

Gravitacioni pomak (crveni ili plavi):



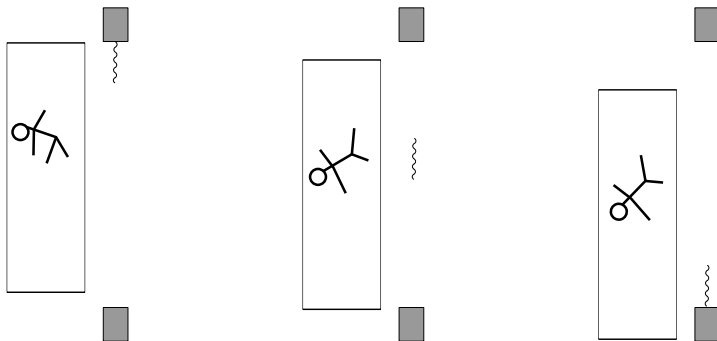
# INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA

Gravitacioni pomak (crveni ili plavi):



## INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA

Gravitacioni pomak (crveni ili plavi):





## INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA

Gravitacioni pomak (crveni ili plavi):

Veličina	Ponašanje
Potencijalna energija $U$	↘
Frekvencija $\nu$	↗
Vreme $t$	↘

## INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA




Gravitacioni pomak (crveni ili plavi):

Veličina	Ponašanje
Potencijalna energija $U$	↘
Frekvencija $\nu$	↗
Vreme $t$	↘

→ Posmatramo dva časovnika koji miruju.

## INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA




Gravitacioni pomak (crveni ili plavi):

Veličina	Ponašanje
Potencijalna energija $U$	
Frekvencija $\nu$	
Vreme $t$	

→ Posmatramo dva časovnika koji miruju. Onaj koji je u gravitacionom polju  $U$  otkucava sporije za faktor  $1 + \frac{U}{c^2}$ .

## INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA

Gravitacioni pomak (crveni ili plavi):

Veličina	Ponašanje
Potencijalna energija $U$	
Frekvencija $\nu$	
Vreme $t$	

- Posmatramo dva časovnika koji miruju. Onaj koji je u gravitacionom polju  $U$  otkucava sporije za faktor  $1 + \frac{U}{c^2}$ .
- Jedini dinamički parametar koji utiče na otkucavanje časovnika je gravitaciono polje.

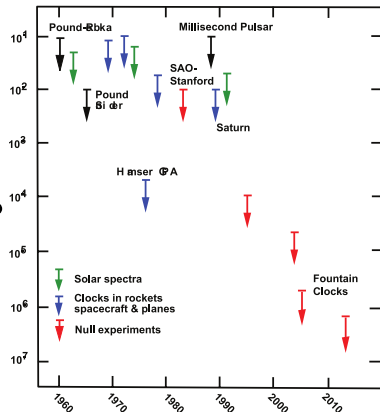
# INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA

Merenje gravitacionog crvenog pomaka:

# INVARIJANTNOST LOKALNOG POLOŽAJA

Merenje gravitacionog crvenog pomaka:

$$\alpha = \left. \frac{\Delta\nu}{\nu} \right|_{\text{th}} - \left. \frac{\Delta\nu}{\nu} \right|_{\text{exp}}$$



# ISTORIJSKI PREGLED

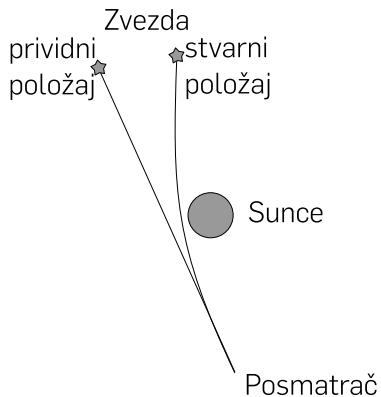
# ROTACIJA PERIHELIA MERKURA



## ROTACIJA PERIHELIA MERKURA

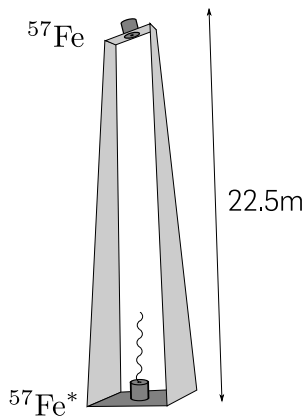
- Nekoliko dana po objavljivanju jednačina OTR Ajnštajn je pokazao da one predviđaju modifikaciju Njutnovog zakona gravitacije.
- Planete se kreću po elipsama koje polako rotiraju.
- Za Merkur efekat se poklopio sa izmerenih 43 lučne sekunde za jedan vek.

# EDINGTONOV EKSPERIMENT



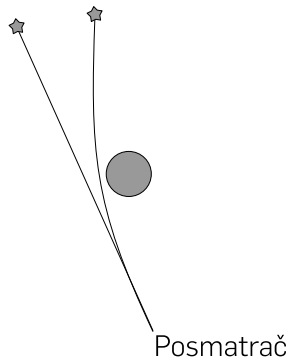
- Eksperiment izveden 29. maja 1919. godine. Provereno Ajnštajново predviđanje da svetlost skreće u gravitacionom polju.
- Rezultati su objavljeni u novembru 1919. godine i definitivno su potvrdili Ajnštajnova predviđanja sa greškom oko 30%.

# POUND-REBKA EKSPERIMENT

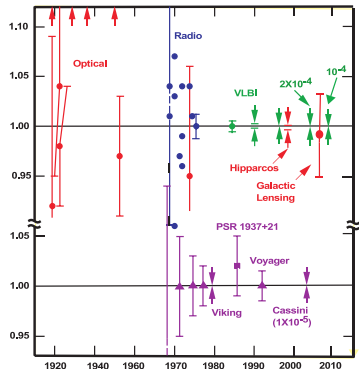
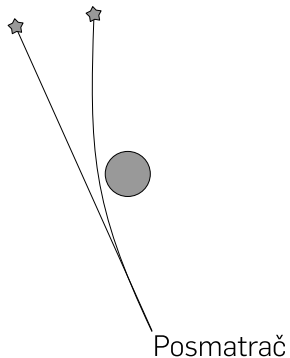


- Eksperimentalno pokazano postojanje gravitacionog crvenog pomaka.
- Prvi rezultati objavljeni 1960. godine.
- Zasnovano na Mesbauerovom efektu.

# GRAVITACIONA SOČIVA



# GRAVITACIONA SOČIVA



# GRAVITACIONA SOČIVA

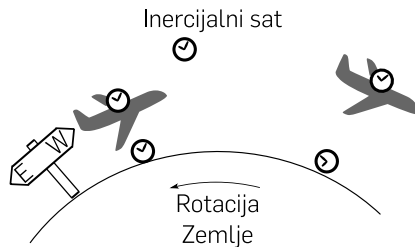
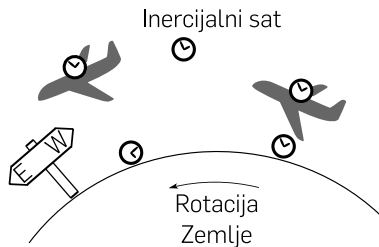
## Interferometarski radio teleskopi



Networks and telescopes used for [YA2009 24hr e-VLBI. Image by Paul Boven <boven@jive.nl>. Satellite image: Blue Marble Next Generation, courtesy of Nasa Visible Earth (visibleearth.nasa.gov).

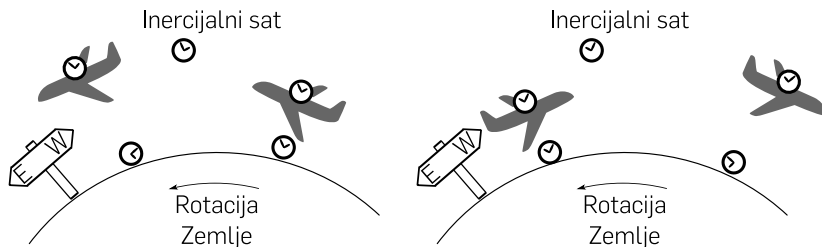
# HAFELE-KITING

## HAFELE-KITING





## HAFELE-KITING



Efekat	Smer	
	Istok	Zapad
STR	$(-184 \pm 18)\text{ns}$	$(96 \pm 10)\text{ns}$
OTR	$(144 \pm 14)\text{ns}$	$(179 \pm 18)\text{ns}$
Ukupno	$(-40 \pm 23)\text{ns}$	$(275 \pm 21)\text{ns}$
Eksperiment	$(-59 \pm 10)\text{ns}$	$(273 \pm 7)\text{ns}$

# RELATIVISTIČKI EFEKTI U SVAKODNEVNOM ŽIVOTU



C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland,  
»Optical Clocks and Relativity«

Science 24 September 2010: Vol. 329 no. 5999 pp. 1630-1633

# RELATIVISTIČKI EFEKTI U SVAKODNEVNOM ŽIVOTU



C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland,  
»Optical Clocks and Relativity«

Science 24 September 2010: Vol. 329 no. 5999 pp. 1630-1633

- Časovnici nove generacije zasnovani na upotrebi femtosekundnih frekventnih češljeva rade na frekvenciji  $10^{15}$  Hz i imaju neodređenost  $10^{17}$  Hz

# RELATIVISTIČKI EFEKTI U SVAKODNEVNOM ŽIVOTU



C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland,  
»Optical Clocks and Relativity«

Science 24 September 2010: Vol. 329 no. 5999 pp. 1630-1633

- Časovnici nove generacije zasnovani na upotrebi femtosekundnih frekventnih češljeva rade na frekvenciji  $10^{15}$  Hz i imaju neodređenost  $10^{17}$  Hz
- Pomoću ovakvih časovnika su proevreni efekti STR pri brzinama  $v = 10$  m/s i OTR pri razlikama u visini  $h = 33$  cm.

# OTKRIĆE PULSARA

→ Otkriveni 1967. godine.

# OTKRIĆE PULSARA

- Otkriveni 1967. godine.
- Neutronske zvezde koje se brzo okreću oko svoje ose. Period rotacije je vrlo stabilan (od milisekunde do sekunde).

# OTKRIĆE PULSARA

- Otkriveni 1967. godine.
- Neutronske zvezde koje se brzo okreću oko svoje ose. Period rotacije je vrlo stabilan (od milisekunde do sekunde).
- Binarni pulsari otkriveni 1974. godine.

POTRAGA ZA JAKIM POLJIMA



# CRNE RUPE

# CRNE RUPE

- OTR predviđa ovo rešenje u kome su prostor i vreme toliko zakrivljeni da čak ni svetlost ne može da napusti tu oblast.

# CRNE RUPE

- OTR predviđa ovo rešenje u kome su prostor i vreme toliko zakrivljeni da čak ni svetlost ne može da napusti tu oblast.
- Prva crna rupa Labud X-1 otkrivena je 1964, ali je postalo jasno da je to crna rupa sredinom osamdesetih.

# CRNE RUPE

- OTR predviđa ovo rešenje u kome su prostor i vreme toliko zakrivljeni da čak ni svetlost ne može da napusti tu oblast.
- Prva crna rupa Labud X-1 otkrivena je 1964, ali je postalo jasno da je to crna rupa sredinom osamdesetih.
  - Masa je 15 puta veća od mase Sunca, prečnik je oko 50 km.
  - Udaljena je od Zemlje 6000 svetlosnih godina.

# CRNE RUPE

- OTR predviđa ovo rešenje u kome su prostor i vreme toliko zakrivljeni da čak ni svetlost ne može da napusti tu oblast.
- Prva crna rupa Labud X-1 otkrivena je 1964, ali je postalo jasno da je to crna rupa sredinom osamdesetih.
  - Masa je 15 puta veća od mase Sunca, prečnik je oko 50 km.
  - Udaljena je od Zemlje 6000 svetlosnih godina.

# CRNE RUPE

→ Supermasivna crna rupa u centru naše galaksije.

# CRNE RUPE

- Supermasivna crna rupa u centru naše galaksije.
- Otkrivena pomoću interferometarskog radio teleskopa 1974. godine. Nazvana Strelac A\*, jer je izvor pobuđen.

# CRNE RUPE

- Supermasivna crna rupa u centru naše galaksije.
- Otkrivena pomoću interferometarskog radio teleskopa 1974. godine. Nazvana Strelac A\*, jer je izvor pobuđen.
  - Udaljena je od Zemlje 26000 svetlosnih godina.
  - Masa je 4,5 milion puta veća od mase Sunca, prečnik je otprilike kao radijus Merkurove orbite.



# CRNE RUPE

- Supermasivna crna rupa u centru naše galaksije.
- Otkrivena pomoću interferometarskog radio teleskopa 1974. godine. Nazvana Strelac A\*, jer je izvor pobuđen.
  - Udaljena je od Zemlje 26000 svetlosnih godina.
  - Masa je 4,5 milion puta veća od mase Sunca, prečnik je otprilike kao radijus Merkurove orbite.
  - Oko nje kruži dvadesetak objekata na osnovu čijeg kretanja saznajemo osobine ove crne rupe.

# CRNE RUPE

- Supermasivna crna rupa u centru naše galaksije.
- Otkrivena pomoću interferometarskog radio teleskopa 1974. godine. Nazvana Strelac A\*, jer je izvor pobuđen.
  - Udaljena je od Zemlje 26000 svetlosnih godina.
  - Masa je 4,5 milion puta veća od mase Sunca, prečnik je otprilike kao radijus Merkurove orbite.
  - Oko nje kruži dvadesetak objekata na osnovu čijeg kretanja saznajemo osobine ove crne rupe.

# ZAKLJUČAK

- OTR je najdugovečnija teorija koja čitav vek preživljava rigorozna testiranja bez osporavanja i kontradiktornosti.

# ZAKLJUČAK

- OTR je najdugovečnija teorija koja čitav vek preživljava rigorozna testiranja bez osporavanja i kontradiktornosti.
- U prvih 50 godina, OTR je bila raj za teoretičare i noćna mora za eksperimentalce.

# ZAKLJUČAK

- OTR je najdugovečnija teorija koja čitav vek preživljava rigorozna testiranja bez osporavanja i kontradiktornosti.
- U prvih 50 godina, OTR je bila raj za teoretičare i noćna mora za eksperimentalce.
- U sledećih 50 godina stvari su se promenile.

# ZAKLJUČAK

- OTR je najdugovečnija teorija koja čitav vek preživljava rigorozna testiranja bez osporavanja i kontradiktornosti.
- U prvih 50 godina, OTR je bila raj za teoretičare i noćna mora za eksperimentalce.
- U sledećih 50 godina stvari su se promenile.
- Možemo da se nadamo da će u narednih 50 godina OTR početi da nalazi primenu u svakodnevnom životu.

# ZAKLJUČAK

- OTR je najdugovečnija teorija koja čitav vek preživljava rigorozna testiranja bez osporavanja i kontradiktornosti.
- U prvih 50 godina, OTR je bila raj za teoretičare i noćna mora za eksperimentalce.
- U sledećih 50 godina stvari su se promenile.
- Možemo da se nadamo da će u narednih 50 godina OTR početi da nalazi primenu u svakodnevnom životu.