

SIMETRIJE U FIZICI,
Zadužbina Ilije M. Kolarca, februar 2019. god.

SUPERSIMETRIJA: Julijus Ves

Marija Dimitrijević Ćirić

Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet,
Beograd, Srbija

Sadržaj:

Standardni model el. čestica

Materija, interakcije

Problemi Standardnog modela

Supersimetrija

Istorijski pregled

Osnovne osobine SUSY modela

Kako pomaže Standardnom modelu?

Julijus Ves (Julius Wess)

Biografija

Veza sa exYu zemljama

Umesto zaključka

Standardni model el. čestica: koncept simetrije

Pitanja: od čega se sastoji materija, šta su elementarne čestice, kako one interaguju?

Odgovori su se manjali sa razvojem nauke (eksperimenti, novi koncepti, teorijski modeli).

Koncept simetrije: zakoni održanja, očuvane veličine, osnovne karakteristike čestica i interakcija.

Prostorne-vremenske simetrije (Igor): translacije, rotacije, . . . Poenkareova simetrija. **MASA, SPIN.**

Unutrašnje simetrije (prof. Šijački): fazna $U(1)$ simetrija EM interakcija, $SU(2)$ izospinska simetrija nuklearne interakcije, **NAELEKTRISANJE, IZOSPIN, STRANOST, . . .**

Standardni model: materija

Čestice materije su leptoni i kvarkovi.

Leptoni:

"Lake" čestice, **spina 1/2**, ne učestvuju u jakim interakcijama. 3 familije, u svakoj lepton i odgovarajući neutrino. Stabilni su e^- i svi neutrini.

Kvarkovi:

Čestice **spina 1/2**, učestvuju u svim interakcijama. 3 familije, materija oko nas izgradjena od kvarkova iz 1. familije. Imaju **izospin**, **stranost**,.... Ne mogu da se vide slobodni, **naelektrisanje** je razlomljeno ($+2/3$ i $-1/3$). Imaju "**boju**" (RGB), ali sve vezane čestice moraju da budu bezbojne!

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

Standardni model: interakcije

U prirodi postoje četiri fundamentalne interakcije: gravitaciona, elektromagnetna, slaba i jaka.

Savremeno shvatanje interakcija:

- lokalizacijom simetrije dobijamo interakciju (gradijentne teorije).
- čestice interaguju razmenjujući prenosioce interakcija.
- masa čestica: spontano narušenje simetrije, Higsov bozon.
- QED, QCD, slaba interakcija i opšta teorija relativnosti kao klasična teorija gravitacije. Eksperimenti potvrđili ove teorije: Higsov bozon (LHC 2012), gravitacioni talasi (LIGO 2016).

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

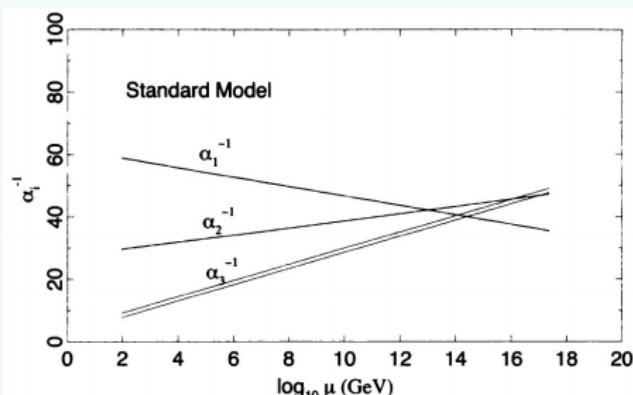
Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Standardni model: problemi

Da li smo zaista odgovorili na sva fundamentalna pitanja?

Postojeći modeli su elegantni (simetrični) i eksperimentalno provereni, ALI...

- ▶ **Slobodni parametri:** Standardni model ima oko 25 nepoznatih veličina čije vrednosti teorija ne predviđa (masa, jačina interakcija, mešanje kvarkova,...).
- ▶ **Ujedinjenje interakcija:** EM i slaba interakcija uspešno ujedinjene u **elektroslabu interakciju**. Očekujemo ujedinjenje i jake interakcije u **Velikoj ujedinjenoj teoriji (GUT)**.



- **Masa Higsovog bozona:** teorija predviđa mnogo veću masu od izmerene.

Masa Higsovog bozona

$$M_H = 126 \text{ GeV}.$$

Doprinos dijagrama sa petljama $\delta M_H \sim \Lambda^2$.

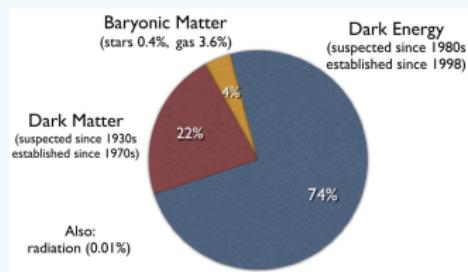
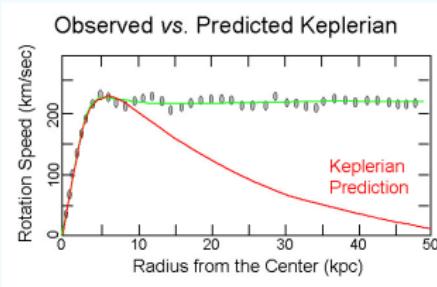
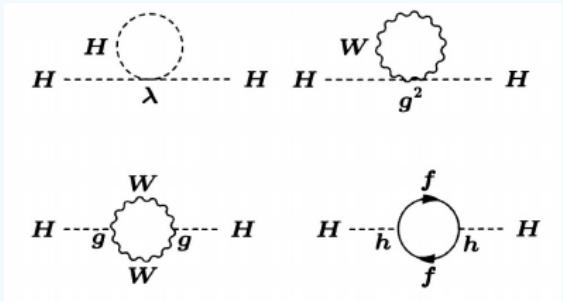
Λ skala nove fizike:

$$\Lambda_{GUT} \sim 10^{14} \text{ GeV},$$

$$\Lambda_{PI} \sim 10^{19} \text{ GeV}.$$

- **Tamna materija:** nepoznat oblik materije u Svemiru.

Nova čestica?



SUSY: istorijat

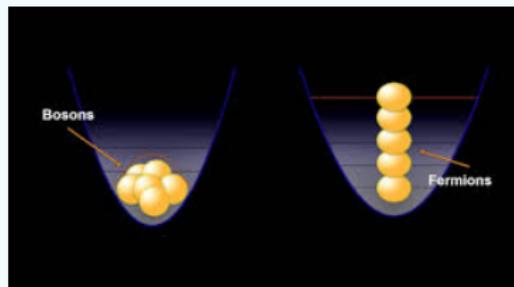
- ▶ 1967. Coleman-Madula no-go teorema: maksimalna prostorno-vremenska simetrija u 4 dimenzije je Poenkareova simetrija. Na nju se mogu dodati unutrašnje simetrije (direktan proizvod). [Nema mešanja fermiona i bozona.](#)
- ▶ 1975. Haag, Lopuczansky, Sohnius: proširenje Poenkareove algebre na [Super-Poenkare algebru](#).
- ▶ 1971-1972. Gol'fand, Likhtman; Volkov, Akulov: Super-Poenkare algebra, masivna SUSY QED.
- ▶ 1971. Ramond; Neveu, Schwarz: supersimetrija na 2D svetskoj površi strune.
- ▶ 1974. [Wess](#), Zumino: [4D model supersimetrične teorije polja](#).
- ▶ 1976. Freedman, Ferrara, van Nieuwenhuizen: ujedinjenje gravitacije, [prvi SUGRA model](#).
- ▶ 1980-danas: razvoj i dominacija teorije struna i supergravitacije i razvoj supersimetrije u okviru njih.

SUSY: fermioni i bozoni

Spin: kvantni broj iz Poenkareove simetrije. Sve čestice imaju spin i dele se na:

- ▶ **Bozone:** celobrojni spin. Skalar $s = 0$ (Higsov bozon), vektor $s = 1$ (foton), tenzor $s \geq 2$ (graviton). **Svi prenosioči interakcija su bozoni.**
- ▶ **Fermioni:** poluceli spin. $s = 1/2$ elektron, proton; $s = 3/2$ Ω^- , Δ^0 . **Sve elementarne čestice materije su fermioni.**

Ponašaju se različito: bozoni su druželjubivi, fermioni su samotnjaci. Više bozona može biti u **istom stanju**. Dva fermiona **ne mogu** da budu u istom stanju (Paulijev princip isključenja).



Da li postoji simetrija koja povezuje materiju i interakcije?

SUSY: osnovni principi

Supersimetrija povezuje materiju i inerakciju: priroda treba da bude simetrična na zamenu **Materija \leftrightarrow Interakcija**.

- **SUSY algebra:** proširenje Poenkareove algebre fermionskim generatorima.

$$[P_\mu, P_\nu] = 0, \quad [M_{\mu\nu}, P_\rho] = -i(g_{\mu\rho}P_\nu - g_{\nu\rho}P_\mu)$$

$$[M_{\mu\nu}, M_{\rho\sigma}] = i(g_{\nu\rho}M_{\mu\sigma} - g_{\nu\sigma}M_{\mu\rho} - g_{\mu\rho}M_{\nu\sigma} + g_{\mu\sigma}M_{\nu\rho}),$$

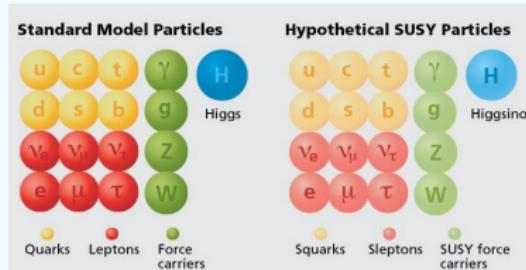
$$\{Q_\alpha, \bar{Q}_\beta\} = 2\sigma^\mu_{\alpha\dot{\beta}} P_\mu, \quad [Q_\alpha, P_\mu] = [\bar{Q}_\alpha, P_\mu] = 0$$

$$\{Q_\alpha, Q_\beta\} = \{\bar{Q}_\alpha, \bar{Q}_\beta\} = 0$$

$$[Q_\alpha, M_{\mu\nu}] = (\sigma_{\mu\nu})_\alpha^\beta Q_\beta, \quad [\bar{Q}^\dot{\alpha}, M_{\mu\nu}] = (\bar{\sigma}_{\mu\nu})^{\dot{\alpha}}_\beta \bar{Q}^\dot{\beta}$$

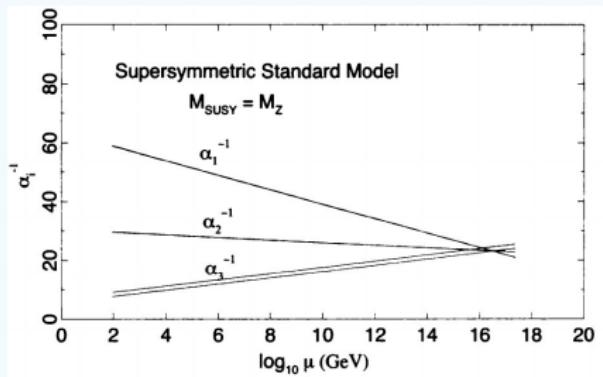
- **Superpartneri**

Mora biti podjednak broj fermiona i bozona: svaka čestica ima superpartnera, iste mase, a spina umanjenog za $1/2$. **Nove čestice!**

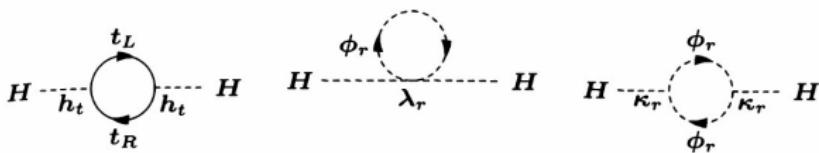


SUSY: kako (da li) pomaže?

- ▶ Interakcije su "bolje" ujedinjene ako se posmatra SM sa supersimetrijom.



- ▶ Masa Higsovog bozona dobija doprinos od SUSY čestica, skraćuju se doprinosi Λ^2 , stabilizuje se masa Higsovog bozona.



- ▶ U SUSY modelima u kojima postoji R -parnost, u verteksu moraju biti uvek dve SUSY čestice. Najlakša SUSY čestica je stabilna! LSP (Lightest Supersymmetric Particle) je prirodni kandidat za Tamnu materiju: najlakši neutralino?
- ▶ MSSM (Minimally Supersymmetric Standard Model): ima oko 120 slobodnih parametara?!
- ▶ Teorija struna koja pretenduje da opiše realnost zahteva postojanje supersimetrije (fermioni).
- ▶ Ujedenjenje gravitacije sa ostalim interakcijama: lokalna SUSY, supergravitacija.

SUSY: eksperiment

Supersimetrija je **narušena**: ne vidimo superpartnere elektrona, miona, . . . (sa istom masom) oko nas.

Mehanizam narušenja supersimetrije nije kao mehanizam narušenja elektroslabe interakcije: ne znamo na kojoj energiji (skali) je SUSY narušena i kako je tačno narušena. Mnogo različitih teorijskih modela . . .

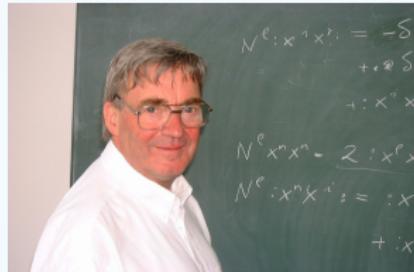
LHC testira (uglavnom) MSSM i energije do 10 TeV : **nema nagoveštaja da supersimetrija postoji**.

Nije (previše) zabrinjavajuće: neki drugi model umesto MSSM-a; skala narušenja veća od 10 TeV , pa superpartneri imaju veću masu, nedostupno LHC-u.

Novi akceleratori, kosmološka merenja?

Julijus Ves: biografija

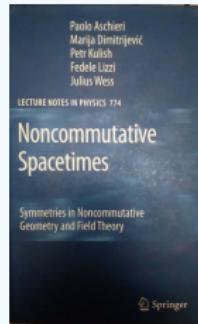
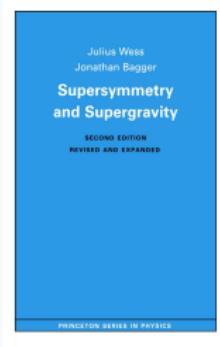
- ▶ 1934. rodjen u Obervolzu (Oberwölz), Austrija.
- ▶ 1957. doktorirao na Univerzitetu u Beču. Mentor Tiring (H. Tiring), ispitičač Šredinger (E. Schrödinger).
- ▶ 1957-1968. CERN, Beč, New York. U Beču upoznaje B. Zumina (B. Zumino), dugogodišnja saradnja i prijateljstvo.
- ▶ 1968-1990. redovni profesor na Univerzitetu u Karlsruheu (Karlsruhe).
- ▶ 1991-2003. redovni profesor na LMU u Minehnu i direktor Max-Plank instituta u Minhenu.
- ▶ 2004-2007. emeritus pozicija, DESY, Hamburg.



Objavneni radovi: 181.

Citati: 18.547.

Knjige: 3.



Rad "Supergauge transformations in four dimensions" (1974) je ciran 2913 puta, dok je rad "A Lagrangian Model Invariant Under Supergauge Transformations" (1974) citiran 1545 puta!

Zašto baš Julijus?

Prof. dr Maja Burić sa Fizičkog fakulteta je doktorirala 1991. godine na Univerzitetu u Karlsruheu, mentor je bio Julius Ves.

Prof. dr Marija Dimitrijević Ćirić je doktorirala 2005. godine na LMU u Minhenu, mentor je bio Julius Ves.

Fizika na teritoriji exYu

1945-1990: veza sa istočnom i zapadnom Evropom, (sistemske) razvoj visokog obrazovanja, univerziteta, nauke.

Obrazovanje naučno-nastavnog kadra u inostranstvu i povratak u Jugoslaviju (Univerzitet u Beogradu: F. Herbut, J. Labat, N. Konjević, Dj. Šijački, Z. Radović, . . .).

Organizacija medjunarodnih konferencija: Adriatic Meetings.

1990-2000: prekid veza i saradnje na exYu teritoriji, kao i sa inostranstvom, otežana naučna komunikacija i mobilnost, odlazak istraživača u inostranstvo.

2000-danas: ponovo uspostavljanje izgubljenih kontakata, mobilnost, medjunarodni projekti, organizacija medjunarodnih konferencija i radionica.

Julijus Ves: čovek iza brojki

Veliki doprinos obnavljanju naučne zajednice na exYu teritoriji posle 1999. godine. **Motivi?**

Julijus je smatrao da istraživači imaju veliku odgovornost na razvoj društva.

Boravak u Americi u toku šezdesetih (Austrijanac-Nemac u Americi posle II svetskog rata) je uticao na njega.

Posete exYu tokom osamdesetih, učešće na Adriatic Meeting-u 1983. gde upoznaje Maju Burić (Marinković tada). Poznanstva i prijateljstva sa istraživačima sa exYu teritorije.

Saradnja sa istraživačima iz istočne Evrope i Rusije: O. Ogrevetsky, E. Ivanov, D. Soroka,...

Wissenschaftler in globaler Verantwortung (WIGV), 1999-2003

Ideja: pomoći exYu zajednici da ponovo uspostavi izgubljene kontakte, poboljšanje uslova rada, moblinost. Metoda "quick wins" (L. Möller).

Rezultati:

- ▶ u okviru DAAD, DFG, MPI, Nemačkog ministarstva za prosvetu i nauku su formirani specijalni fondovi za finansiranje istraživačkih poseta naučnika sa exYu teritorije Nemačkoj. Neki od "korisnika": G. Djordjević (PMF Niš), B. Jovanović (Matematički institut SANU), B. Femić (Novi Sad), M. Burć, V. Radovanović (FF Beograd),...
- ▶ Donacije knjiga bibliotekama Univerziteta u Banjaluci i Tuzli.

- ▶ SINSEE/SINYU projekat: potpuno obnovljena akademска mrežа u Srbiji u periodu 2001-2002. Finansijska podrška Nemačkog ministarstva za prosvetu i nauku od 300.000 evra i naše vlade.



- ▶ (Su)finansiranje konferencija i radionica na exYu teritoriji:
2001: Sokobanja, German-Serbian school in modern mathematical physics (Nemačko ministarstvo, naša vlada)
 Dubrovnik, 8th Adriatic Meeting (Volkswagen fondacija).



- 2002:** Kopaonik II summer school in modern mathematical physics (DAAD).

2003: Vrnjačka Banja, BW2003 (DAAD, DFG, UNESCO, ICTP, naše ministarstvo). Početak rada SEENET-MTP mreže.

Dubrovnik, 8th Adriatic Meeting (Volkswagen fondacija).



SEENET-MTP, 2003-danas

Mreža Jugoistočne Evrope za teorijsku i matematičku fiziku, formirana na BW2003 konferenciji.

Finansiranje: UNESCO, ICTP, CERN.

Aktivnosti: organizacija konferencija (~ 20), mobilnost istraživača u regionu (~ 300), seminari (~ 200).

CERN-SEENET-MTP PhD Training Program: seminari-škole za studente doktorskih studija iz regionala. Do sada organizovane u Beogradu (2015), Bukureštu (2015), Temišvaru (2016), Sofiji (2017) i Nišu (2018).



Rad sa Julijusom 2002-2007

LMU, Minhen 2002-2005: doktorat (nekomutativna teorija polja i gravitacija).

Mini grupa: postdok, 3 doktoranta, diplomka. I Julijus. Diskusije ispred table, Julijusovo izuzetno razumevanje fizike, toliko da se činilo da je fizika jednostavna. Napredovanje u malim koracima, bez pompeznih ideja i ciljeva. **Puno smo naučili od njega.**

Iako nije radio sa svim članovima grupe (naročito u mlađim danima u Karlsruheu), vodio je računa da svako ima obezbedjeno finansiranje.



DESY, Hamburg 2005-2007: više poseta (sa kolegom V. Radovanovićem), rad na nekomutativnoj deformaciji SUSY teorija. Iznenada i prerano je naš rad prekinut: 8. avgusta 2007. Julijus Ves se upokojio (posle iznenadnog moždanog udara).
Bayrischzell workshop: godišnja konferencija Julijusove grupe, još uvek se sastajemo.



Saradjujemo sa članovima Julijusove grupe i dalje (L. Jonke, P. Aschieri). Saradjujemo i sa istraživačima koje smo upoznali zahvaljujući Julijusu i njegovom angažovanju (J. Madore, G. Zoupanos, L. Casellani, A. Samsarov, R. Szabo, F. Lizzi, P. Vitale, . . .).

Umesto zaključka

Julijus nije jedini koji je doprineo razvoju SUSY teorija, ali je dao značajan doprinos ovoj temi.

Radio je i na drugim problemima: kvantna teorija polja, nekomutativna teorija polja i gravitacija.

Veliki uticaj na grupe u Beogradu, Zagrebu, Nišu, Sofiji, Torinu, Beču, Bremenu,...

Nadamo se da je zadovoljan kako smo nastavili tamo gde je on stao.