



Факултет медицинских наука у Крагујевцу

Основне струковне студије

Прва година

Први семестар

Предмет: Физиологија



Физиологија кардиоваскуларног система

(четврта недеља)

Физиологија срца

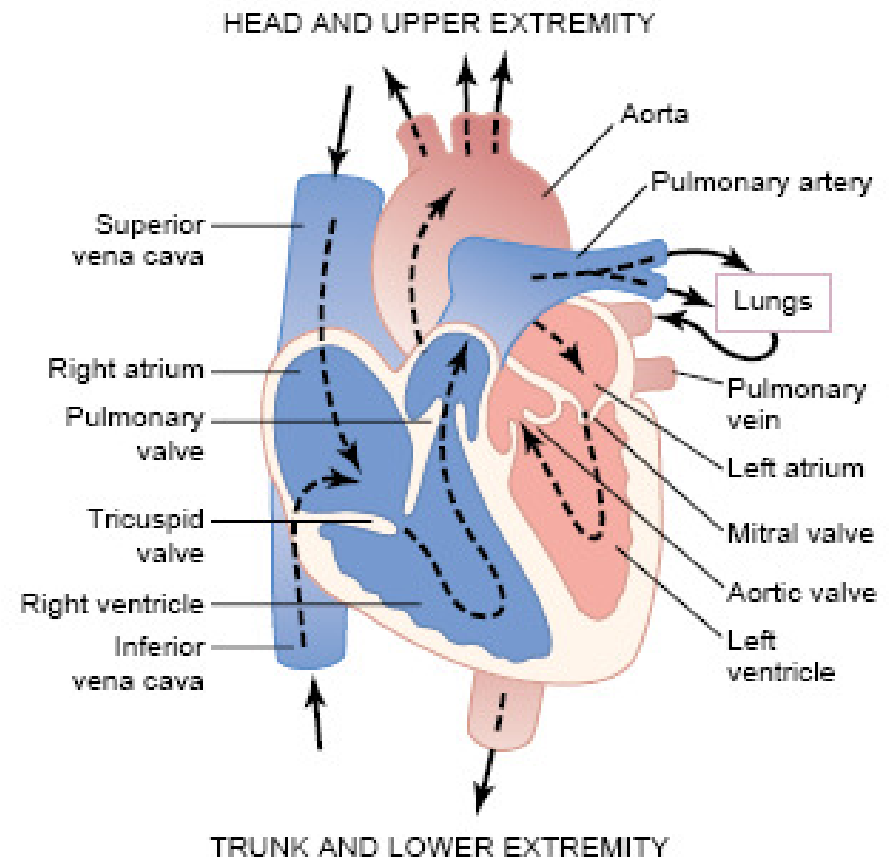
Проф. др Сузана Пантовић

Срце се састоји од две одвојене половине:

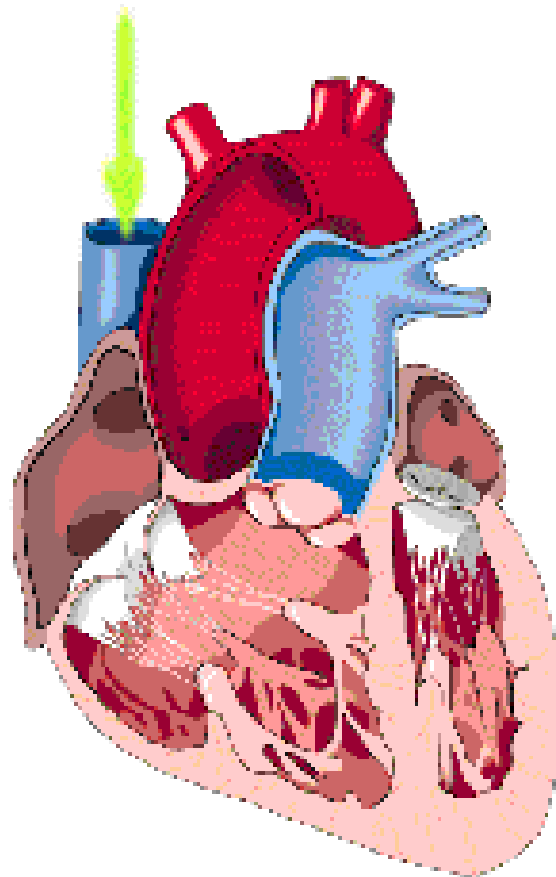
десно срце које пумпа крв кроз плућа и

лево срце које пумпа крв кроз периферне органе.

Свака од ове две половине је пулзирајућа пумпа и састоји се од по две шупљине: преткоморе и коморе.



Грађа срца и смер којим крв тече кроз срчане шупљине



- **Right Atrium**
- **Tricuspid Valve**
- **Right Ventricle**
- **Pulmonic Valve**
- **Pulmonary Arteries**
- **Pulmonic Veins**
- **Left Atrium**
- **Mitral Valve**
- **Left Ventricle**
- **Aortic Valve**
- **Aorta**

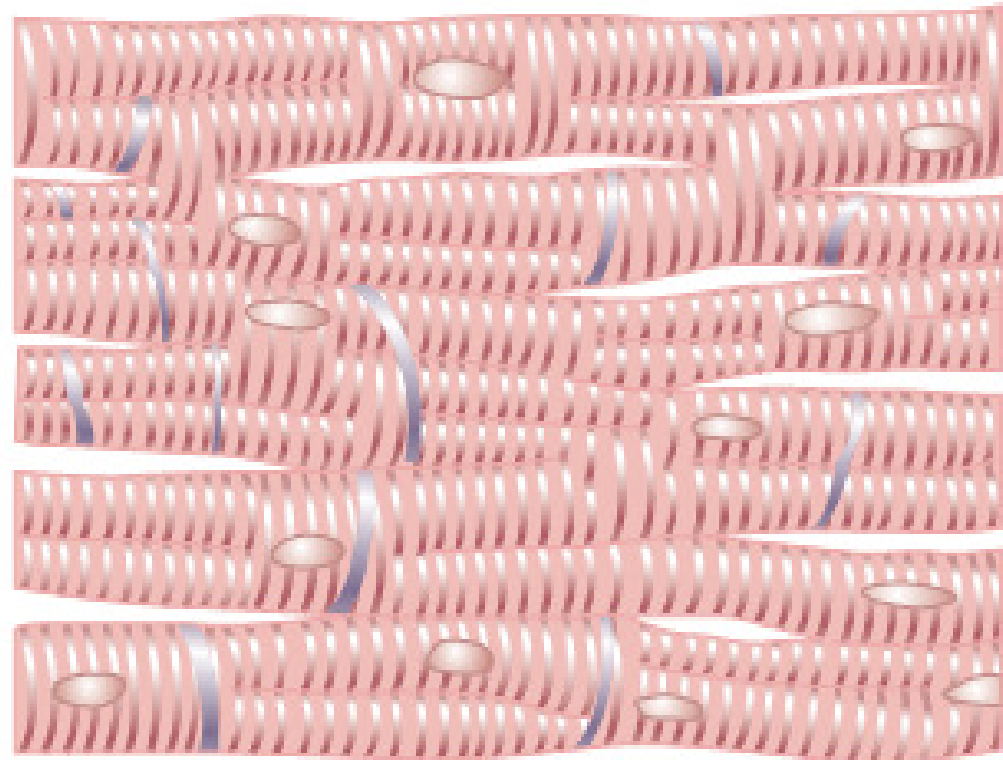
Грађа срца и смер којим крв тече кроз срчане шупљине

ФИЗИОЛОГИЈА СРЧАНОГ МИШИЋА

Срчани мишић је попречно-пругаст (као и скелетни) и садржи актинске и миозинске филаменте који у току контракције клизе један дуж других, на исти начин као у скелетном мишићу.

Интеркалатни дискови (*discus intercalatus*)

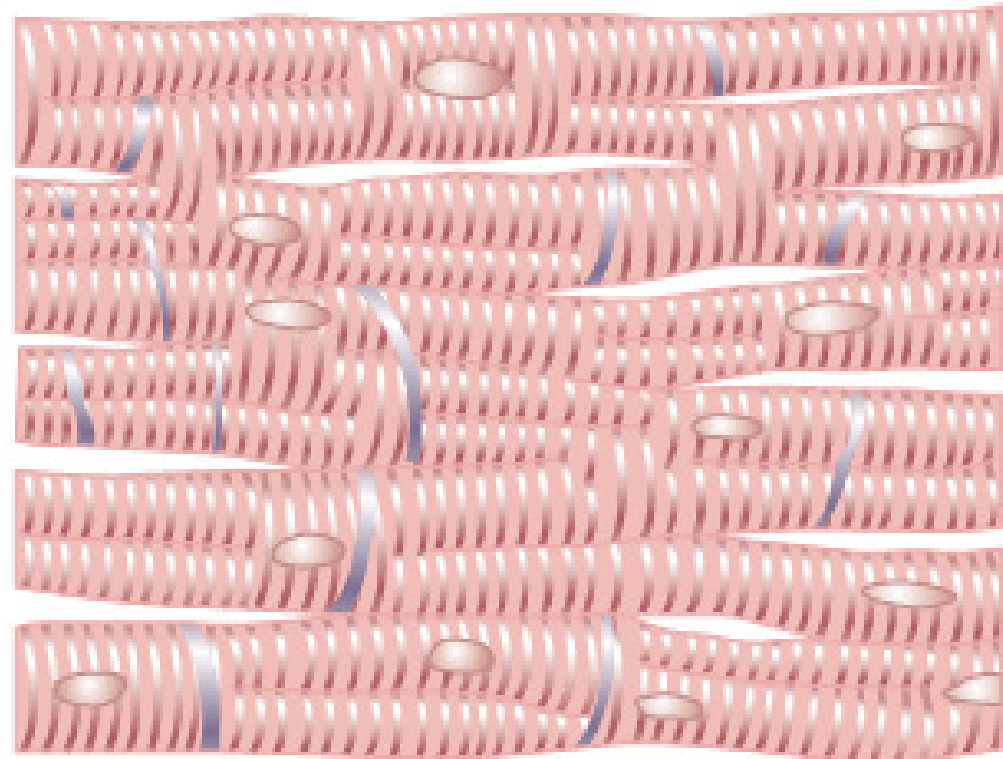
се јављају на крајевима ћелија и заправо су ћелијске мембране које раздвајају појединачне ћелије срчаног мишића.



Gap junctions – порозне везе

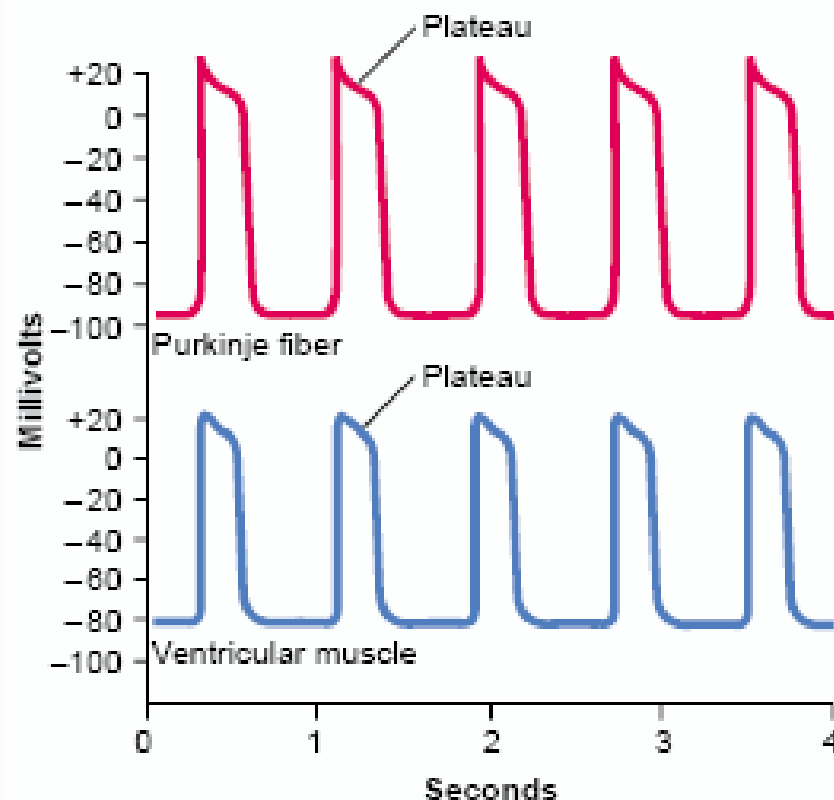
- су присутне на интеркалатним дисковима и “**путеви су ниског отпора**” (400 пута мањи отпор) између ћелија који омогућавају брзи пренос акционог потенцијала
- објашњавају чињеницу да се срце понаша као **електрични синцицијум**.

“Синцицијумска” природа
срчаних мишићних влакана



Мировни мембрански потенцијал у срчаном мишићу износи -85 до -95 mV, а у специјализованим Пуркињевим влакнима око -90 до -100 mV.

Акциони потенцијали Пуркињевог влакна и мишићног влакна у срцу имају **плато**-фазу (за разлику од скелетног мишића) због чега контракција у срчаном мишићу траје до 15 пута дуже него у скелетном.



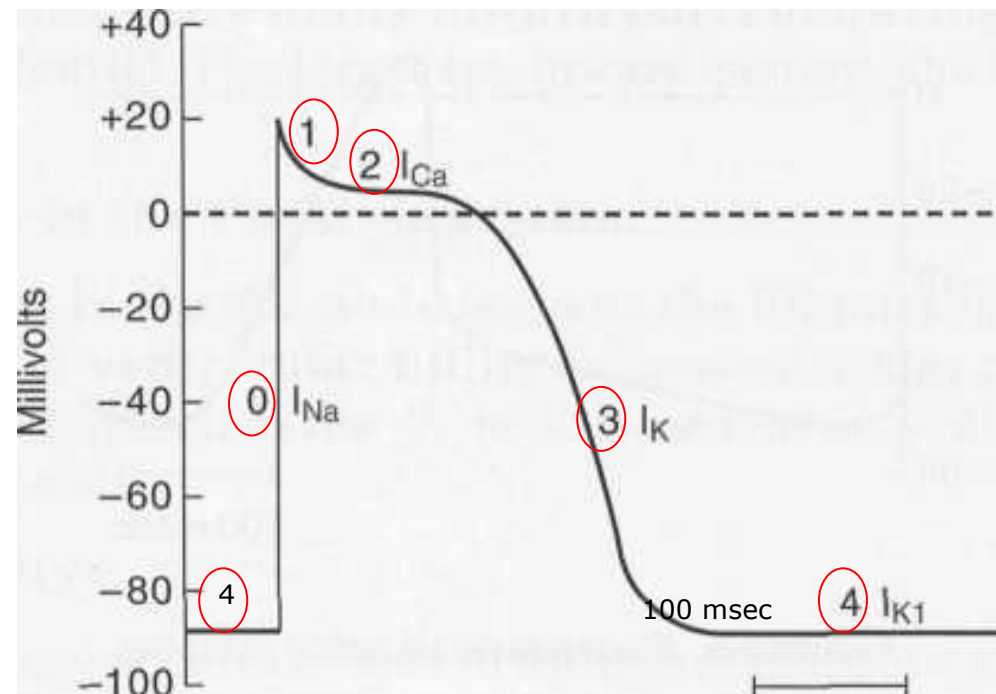
Ритмички акциони потенцијали (у mV) Пуркињевог влакна и мишићног влакна комора, регистровани помоћу електроде

АКЦИОНИ ПОТЕНЦИЈАЛИ СРЦА

Коморе, преткоморе и Пуркињев систем

- Имају стабилан мировни мембрански потенцијал од око -90 миливолти (mV).
- Акциони потенцијали дуго трају, нарочито у Пуркињевим влакнима, где трају око 300 милисекунди (ms).

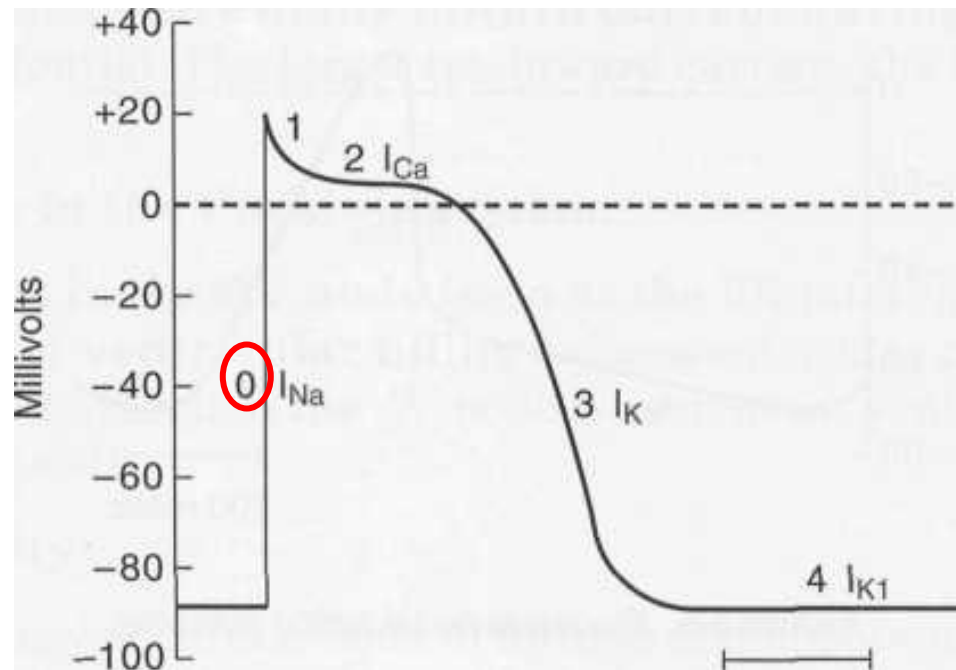
○ Фазе акционог потенцијала



Фаза 0

-Је нагли скок потенцијала, [деполяризација](#).

-Настаје пролазним повећањем **проводљивости за Na^+** .
То доводи до уласка позитивних Na^+ јона (волтаж-зависни Na^+ канали) што деполяризује мембрану.

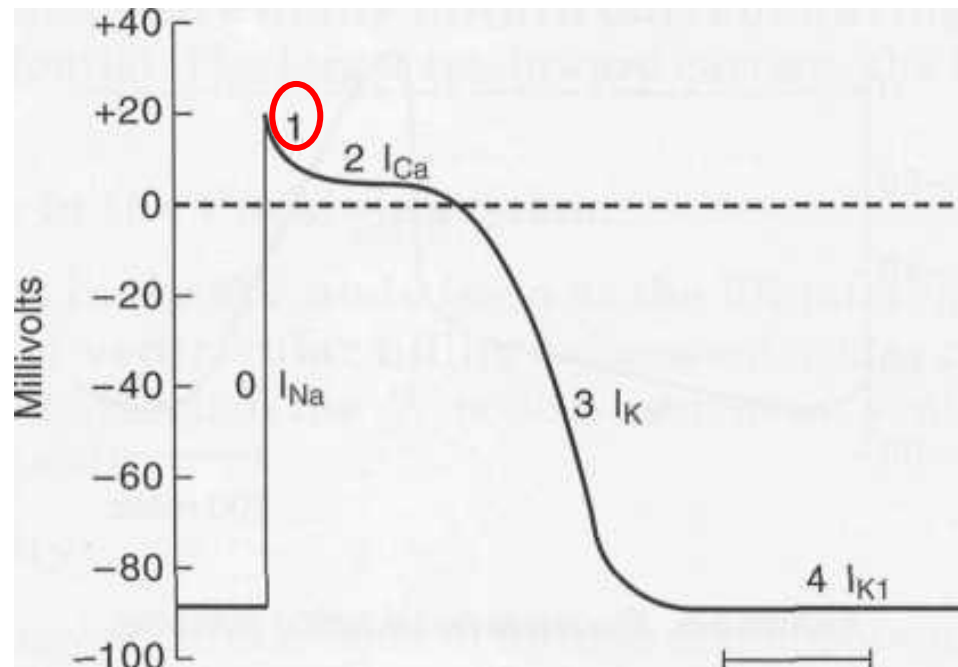


Фаза 1

-Је кратак период **иницијалне реполаризације**

-Иницијална реполаризација настаје као последица смањења позитивног наелектрисања у ћелији, делом услед изласка јона K^+ (фаворизованог од стране хемијског и електричног градијента) из ћелије а делом услед смањене проводљивости за јоне Na^+ .

(Брзи волтаж-зависни Na^+ канали се затварају а спорији волтаж-зависни K^+ канали се отварају)



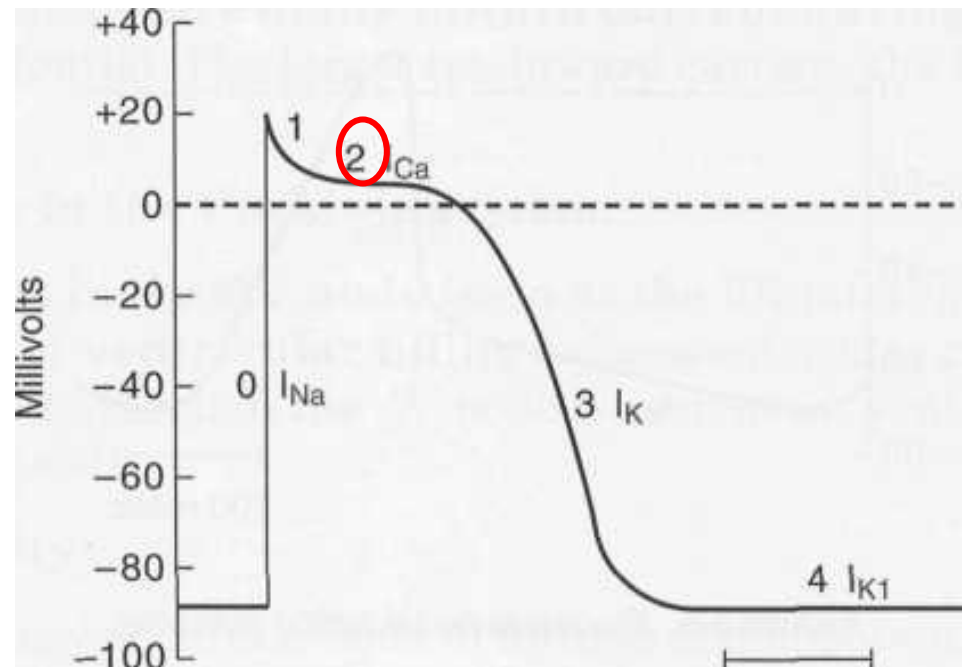
Фаза 2

-је **"plateau"** (плато) акционог потенцијала

-настаје услед пролазног **повећања проводљивости за Ca^{2+}** , што доводи до **уласка** позитивних јона Ca^{2+} у ћелију, и смањења проводљивости за K^{+} .

(Отворени су спори волтаж-зависни калцијумско-натријумски канали као и спори волтаж-зависни калијумски канали.)

-Током фазе 2, излазак (K^{+}) и улазак (Ca^{2+}) јона је приближно исти, тако да се потенцијал мембране одржава на плато нивоу.

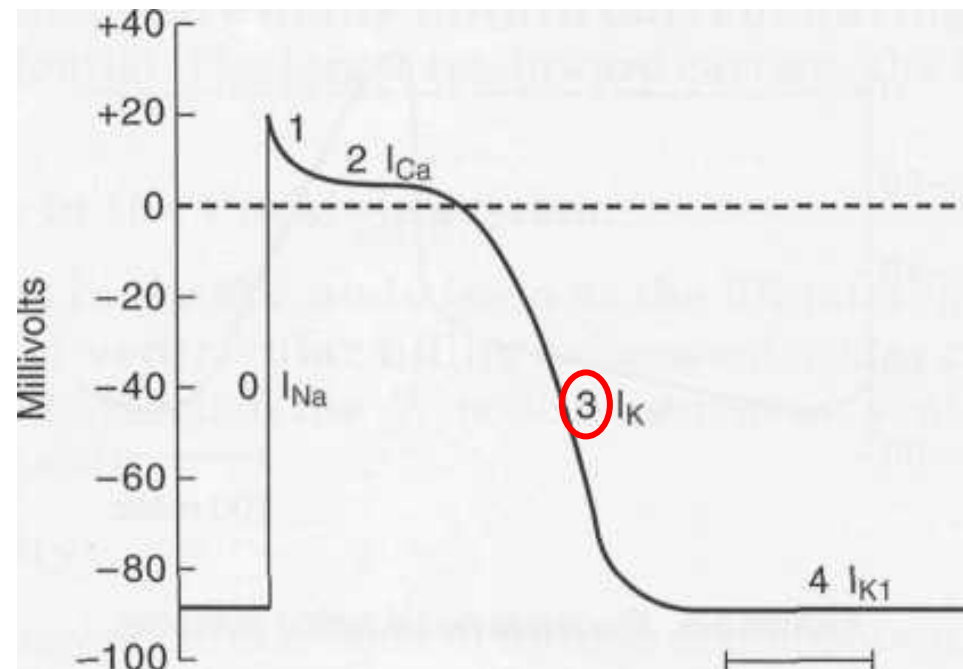


Фаза 3

-је **реполаризација**

-Током фазе 3, проводљивост за јоне Ca^{2+} се смањује, док се проводљивост за јоне K^{+} повећава.

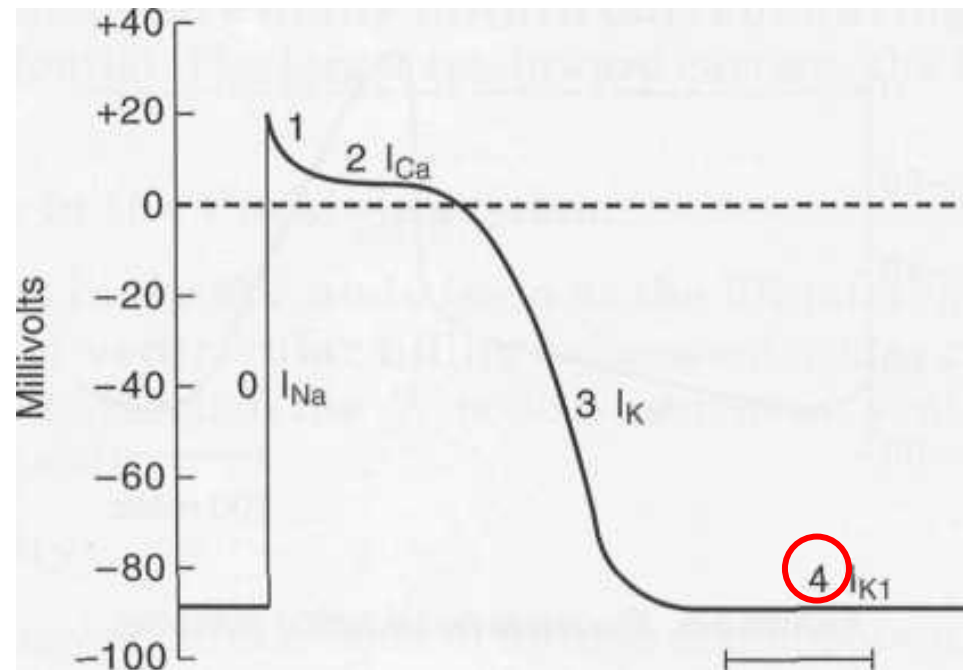
(Затворени су спори волтаж-зависни калцијумско-натријумски канали док су спори волтаж-зависни калијумски канали отворени.)



Фаза 4

-представља **мировни мембрански потенцијал**

-то је период у коме је улазак и излазак позитивних јона у/из ћелије једнак.



Ексцитабилност

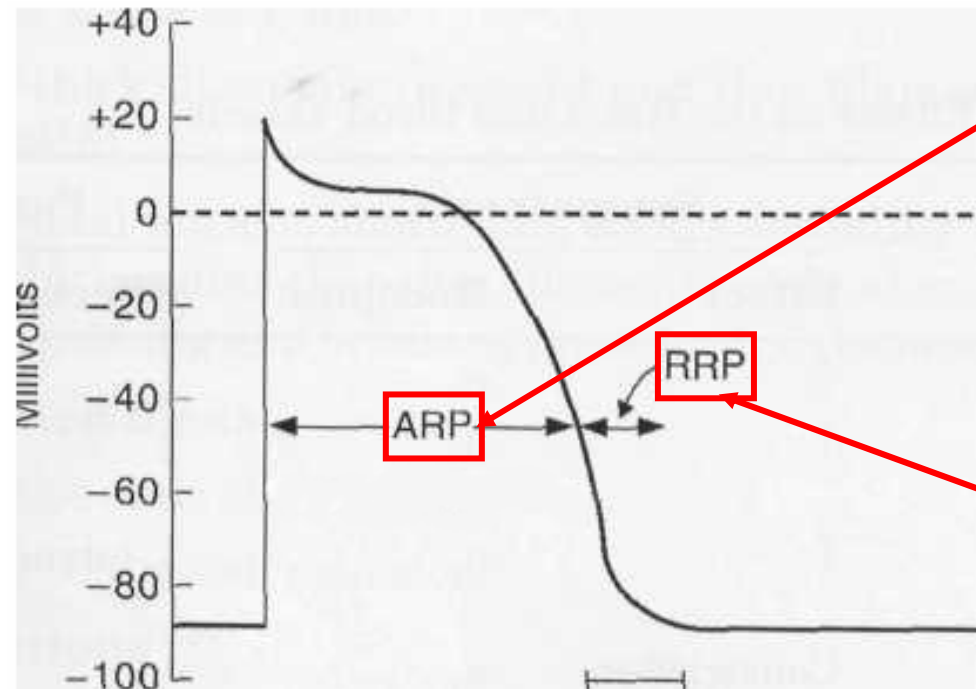
-је способност ћелија срца да иницирају акционе потенцијале у одговору на деполяризујући улазак позитивних јона.

Апсолутни рефракторни период (ARP)

- започиње фазом успона (скока) акционог потенцијала и завршава се након платоа.
- представља време током кога **акциони потенцијал не може да започне** без обзира на јачину стимулуса.

Релативни рефракторни период (RRP)

- је период непосредно након ARP када је реполаризација скоро завршена.
- је период током кога акциони потенцијал **може да се изазове**, али потребан је **већи улазак позитивног наелектрисања у ћелију**.



апсолутни
рефракторни период

релативни
рефракторни период

ЋЕЛИЈСКА СТРУКТУРА СРЧАНОГ МИШИЋА

Саркомера-је контрактилна јединица мишићне ћелије срца.

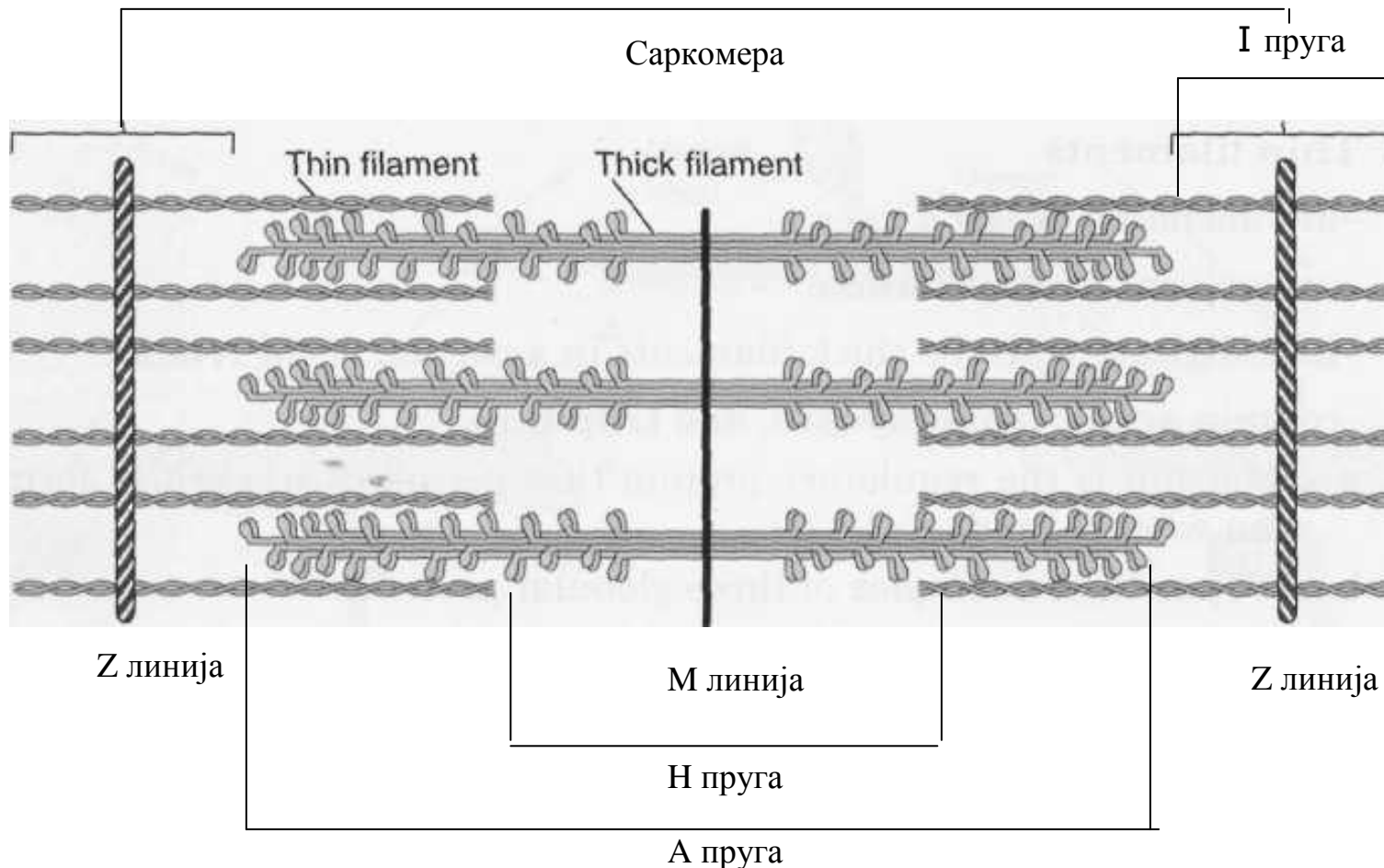
-слична је контрактилној јединици у скелетном мишићу.

-пружа се између две Z линије.

-садржи дебеле филаменте - миозин и танке филаменте – актин

(садржи три протеинске компоненте: актин, тропонин, тропомиозин).

-Као у скелетном мишићу, скраћење се јавља у складу са моделом клизања филамента, који означава клизање танких филамената дуж суседних дебелих филамената, стварањем попречних мостова између актина и миозина.

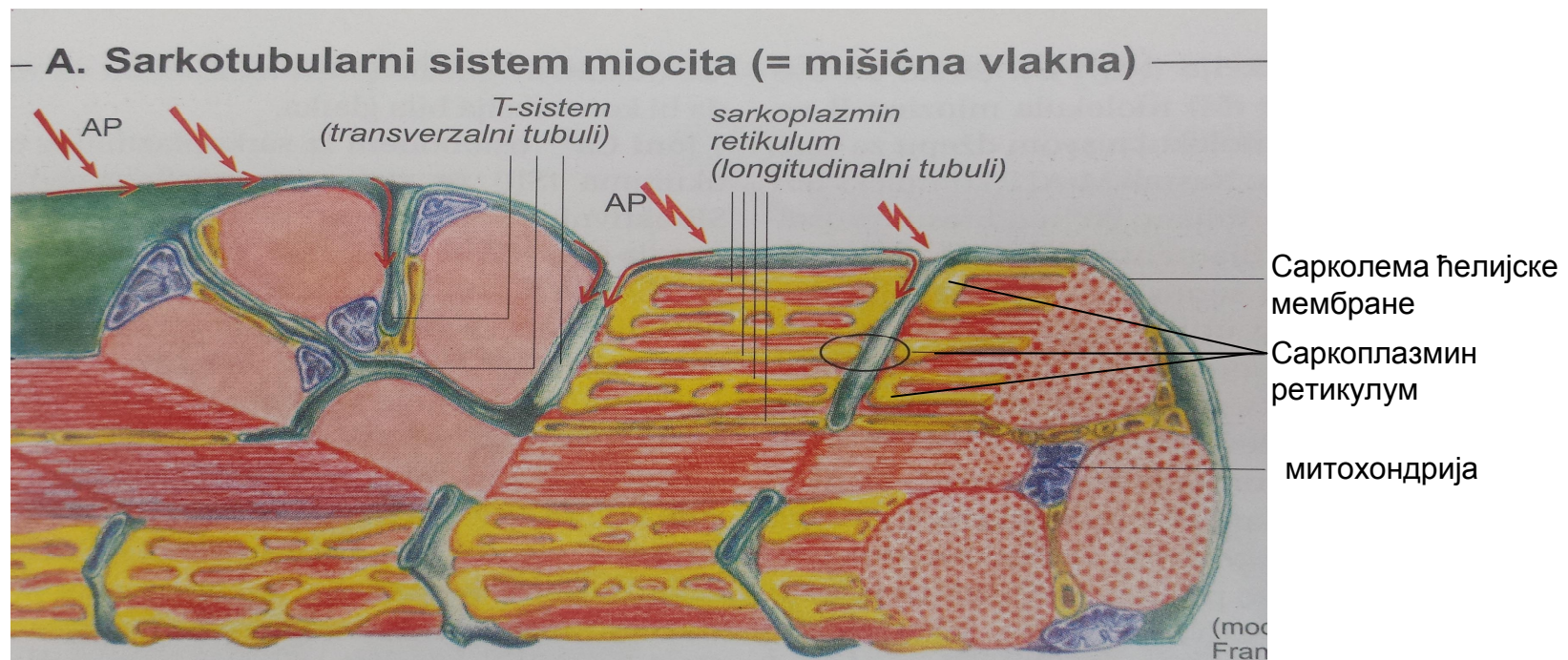


Митохондрије

-су бројније у срчаном него у скелетном мишићу.

Т тубуле

- дубоке инвагинације ћелијске мембране
- лоциране су у области Z линије и омогућавају преношење акционог потенцијала у унутрашњост ћелије.
- добро су развијене у коморама, али слабо у преткоморама.
- поред Ca^{2+} који се у саркоплазму ослобађа из саркоплазматског ретикулума, током акционог потенцијала у саркоплазму дифундује и велика количина Ca^{2+} из Т-тубула.



Кораци у повезивању експитације-контракције

Акциони потенцијал се пружа од ћелијске мембране до Т тубула. 1

Током плато фазе акционог потенцијала проводљивост за калцијумове јоне (Ca^{2+}) је повећана и Ca^{2+} улазе у ћелију из екстрацелуларне течности (**ток позитивних јона Ca^{2+} у ћелију**). 2

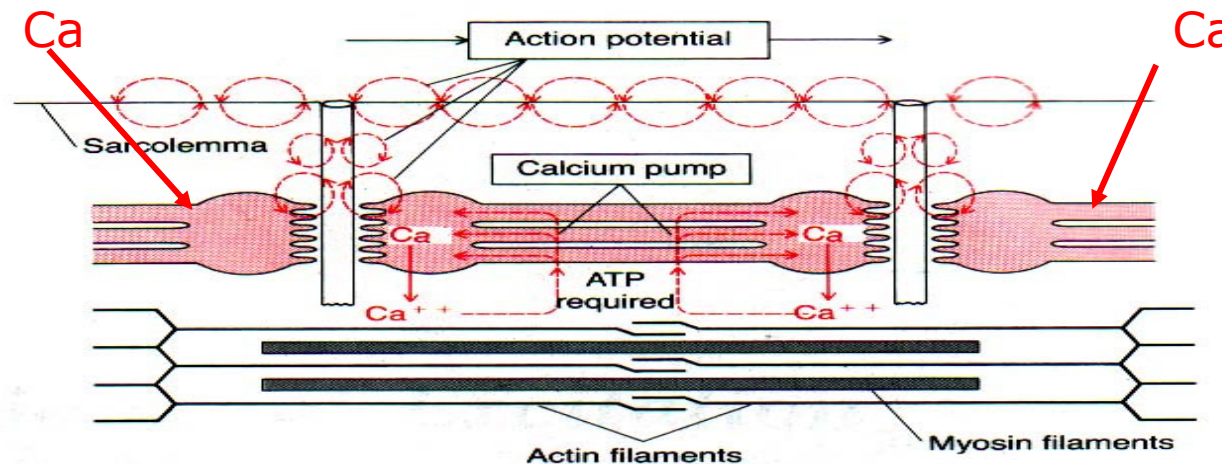
Улазак јона калцијума изазива ослобађање још више калцијума из SR (**Ca^{2+} -индуковано ослобађање Ca^{2+}**). 3

Количина ослобођеног Ca^{2+} из SR зависи од претходно ускладиштене количине Ca^{2+} и од броја позитивних јона који су током плато фазе акционог потенцијала ушли у ћелију. 4

Као резултат овог ослобађања Ca^{2+} , **интрацелуларна концентрација Ca^{2+} расте**. Ca^{2+} се везују за тропонин С (це), тропомиозин се помера и на тај начин отклања инхибицију везивања између актина и миозина. 5

Актин и миозин се повезују, танки и дебели филаменти клизе један између другог, и мишићна ћелија се контрахује. **Вредност напона који се развија је пропорционална интрацелуларној концентрацији Ca^{2+}** . 6

Релаксација се јавља када се Ca^{2+} уклоне из цитосола: 1) у SR радом тзв. Ca^{2+} -АТФ-азне пумпе (SERCA) и 2) преко мембране кардиомиоцита помоћу NCX (3Na^{+} - Ca^{2+} измењивача) и мање путем Ca^{2+} -АТФ азне пумпе која се налази на мембрани кардиомиоцита. 7



Подсетимо се да је у срчаном мишићу слабије развијен саркоплазматски ретикулум него у скелетној мускулатури



Трајање контракције:

преткоморски мишић - 0.2 s

мишић комора - 0.3 s

Утицај фреквенције срца на трајање контракције:

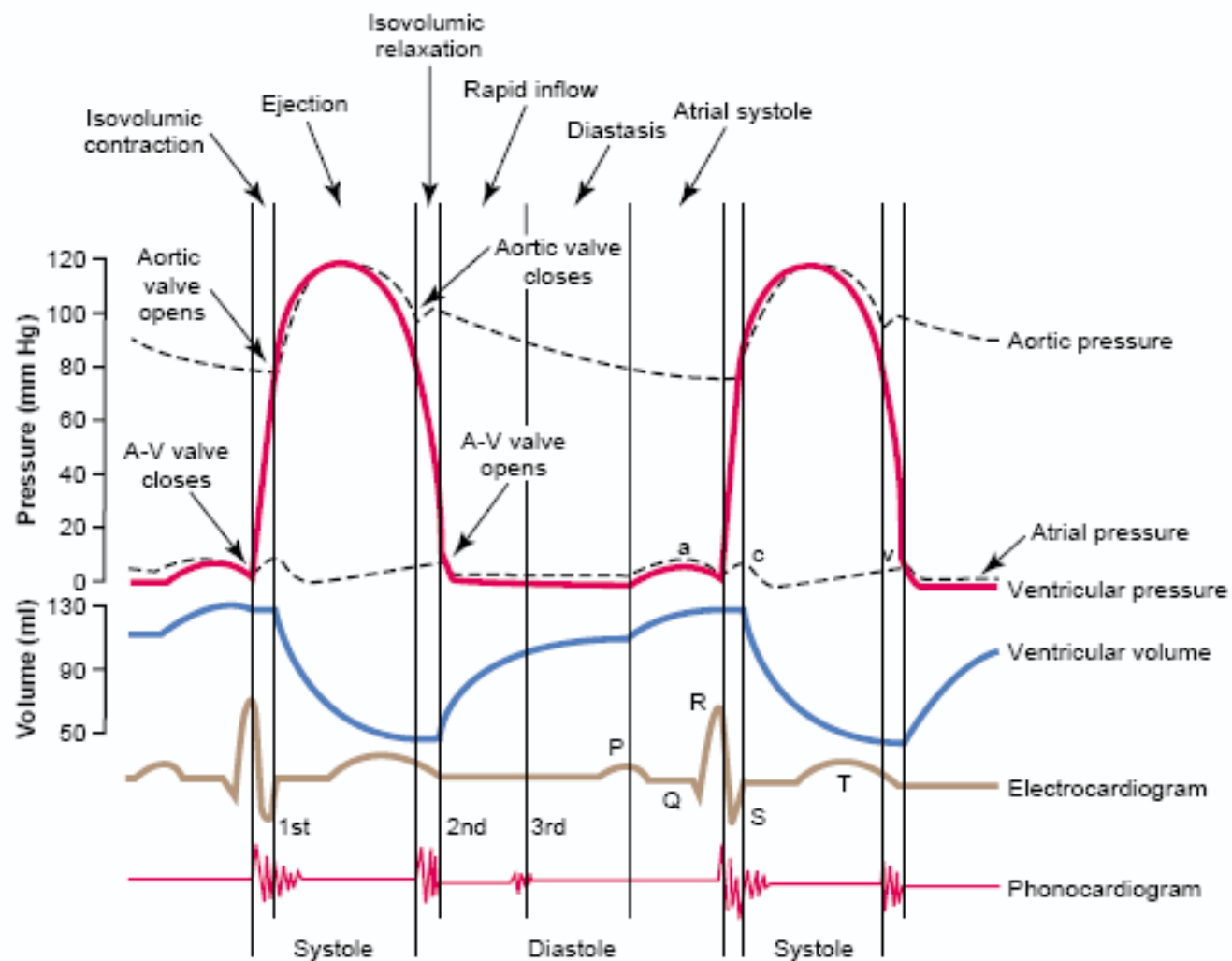
Када се фреквенција срца повећа, скраћује се трајање фазе контракције и фазе релаксације у сваком срчаном циклусу.

Период контракције (систола) се скраћује али мање него период релаксације (дијастола).

При нормалној фреквенцији срца од око 70/min период контракције обухвата око 40% читавог срчаног циклуса. При повећању фреквенције од три пута, период контракције обухвата око 65% читавог циклуса.

ПОСЛЕДИЦА? (РАЗМИСЛИМО)

СРЧАНИ ЦИКЛУС

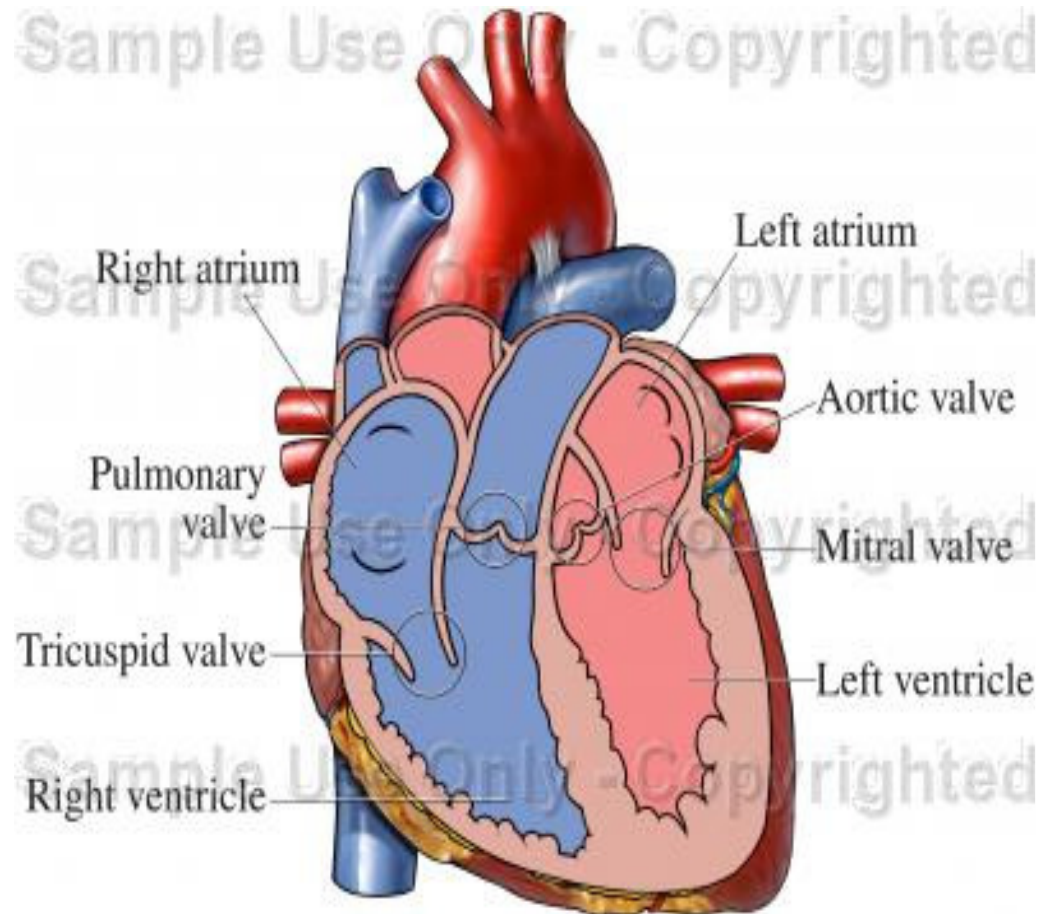


СРЧАНИ ЗАЛИСЦИ

A-V (atrio-ventrikularne) валвуле (трикуспидална и митрална валвула) спречавају да се крв за време систоле враћа из комора у преткоморе.

Семилунарне валвуле (валвула аорте и валвула пулмоналне артерије) за време дијастоле спречавају да се крв враћа из аорте и плућне артерије у коморе.

Срчане валвуле се пасивно отварају и затварају као последица **градијента притиска**.

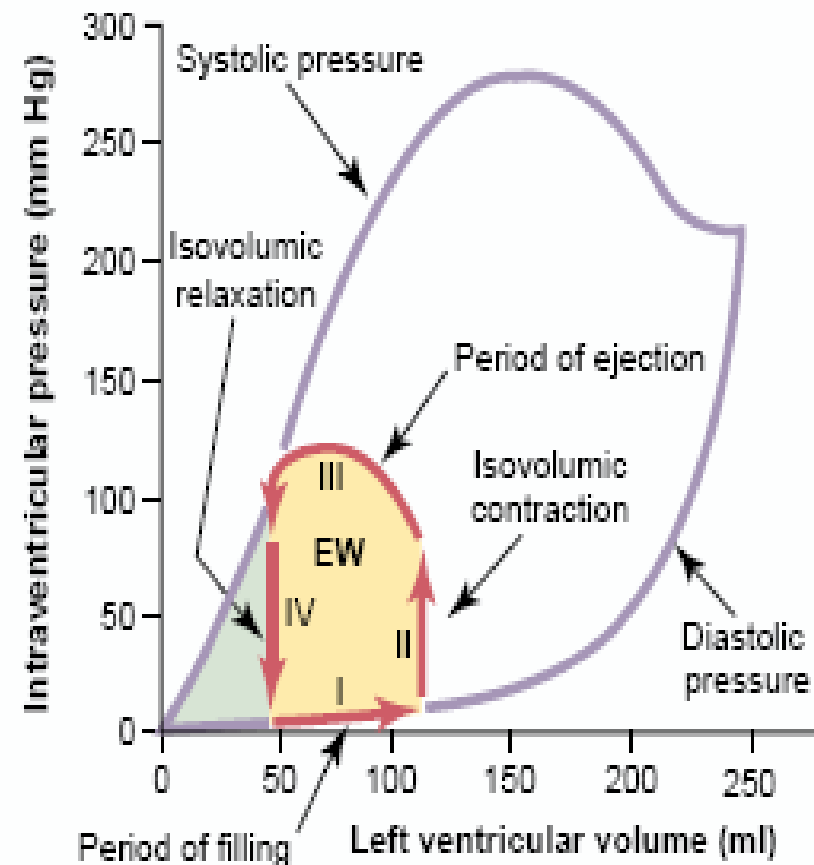


РАД СРЦА

Величина срчаног рада (stroke work output) је количина енергије коју срце претвара у рад током сваке контракције пумпајући крв у артерије. Срчани рад се састоји из *спољашњег рада* и *кинетичке енергије тока крви*.

Крива притисак-волумен у коморама

- Је конструисана комбиновањем две криве: криве систолног и криве дијастолног притиска.
- Крива дијастолног притиска представља однос притиска и волумена у коморама за време дијастоле.
- Крива систолног притиска представља однос између притиска и волумена у коморама за време систоле.



- Један срчани циклус који обухвата контракцију (избацивање крви из комора) и релаксацију (пуњење комора) се може приказати кривом (петљом) притисак – волумен.

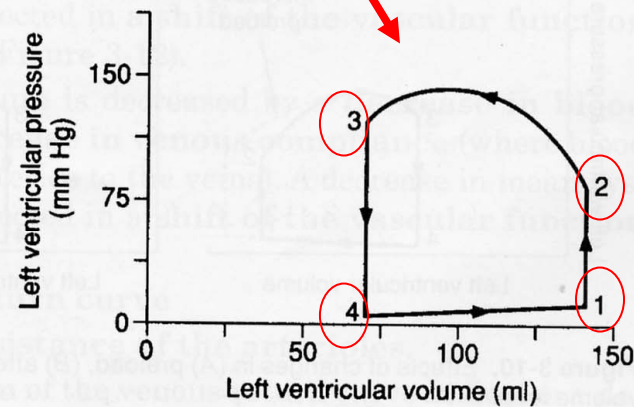


Figure 3-9. Left ventricular pressure–volume loop.

Фазе дијаграма притисак-волумен

1 → 2 (изоволуметријска контракција).

Циклус почиње током систоле у тачки 1.

Лева комора је пуна крви која је пристигла из леве преткоморе и њена запремина износи око 120-140 ml (то је волумен на крају дијастоле - **енд-дијастолни волумен**). Притисак у коморама је низак јер су мишићи комора релаксирани. Током ексцитације, коморе се контрахују и притисак у њима расте. Када притисак у левој комори порасте изнад вредности притиска у левој преткомори долази до затварања митралних валвула. Како су у том тренутку све валвуле затворене крв не излази из коморе.

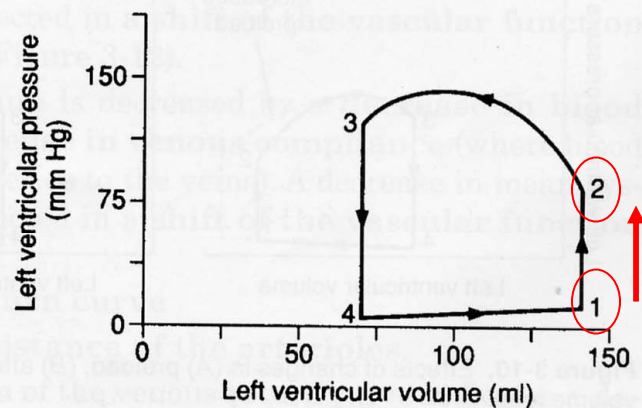
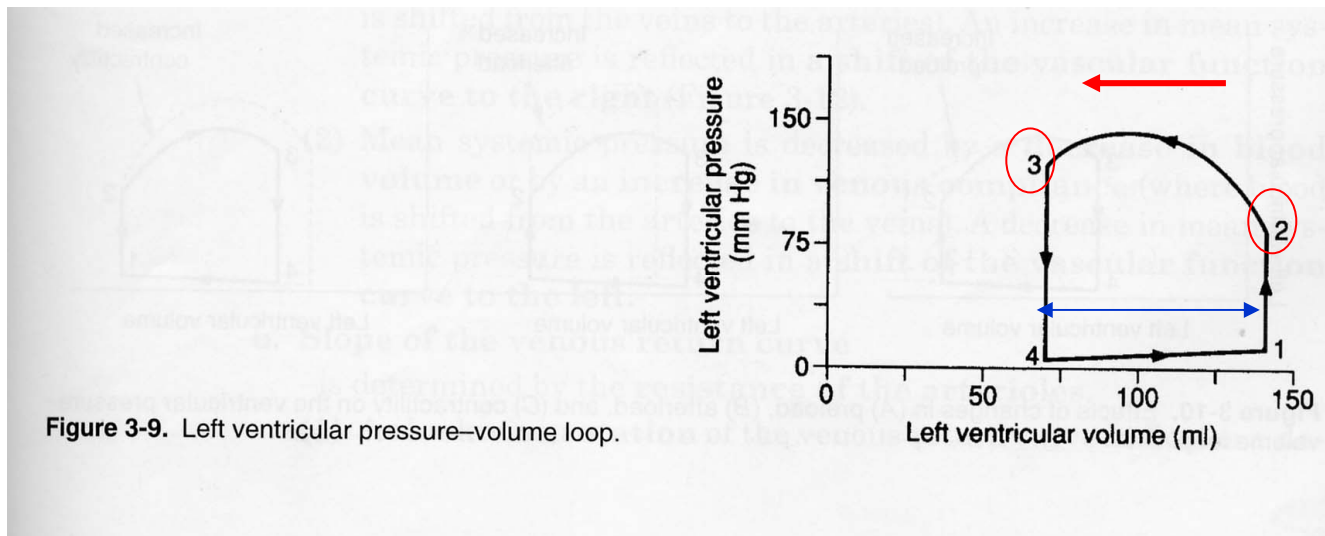


Figure 3-9. Left ventricular pressure–volume loop.

Фазе дијаграма притисак-волумен

2 —» 3 (фаза избакивања, ејекције). Када притисак током систоле у левој комори порасте изнад вредности дијастолног притиска аорте долази до отварања аортних валвула (тачка 2). Крв почиње да се избацује у аорту, притисак у комори услед систоле и даље расте (почетак фазе ејекције) и достиже вредност систолног притиска у аорти. Како запремина крви у коморама током ејекције пада, долази и до пада притиска у њима (спора фаза ејекције) и када притисак у аорти надмаши притисак у комори затварају се семилунарне валвуле. Количина крви која се при томе избаци из коморе назива се **ударни волумен**. Тако се ударни волумен графички може приказати преко ширине криве притисак-волумен (\longleftrightarrow). Запремина крви која након тога остане у левој комори (тачка 3) се назива **енд-систолни волумен** (у нормалним физиолошким условима износи око 50ml).



Фазе дијаграма притисак-волумен

3 —> 4 (изоволуметријска релаксација).

Комора је релаксирана (тачка 3)

Када притисак у комори падне испод вредности притиска у аорти, долази до затварања аортних валвула. Како су поново све валвуле затворене, запремина крви у комори је константна а притисак у њој пада.

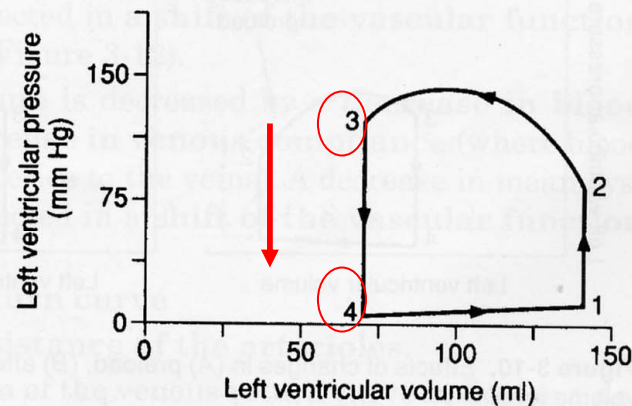
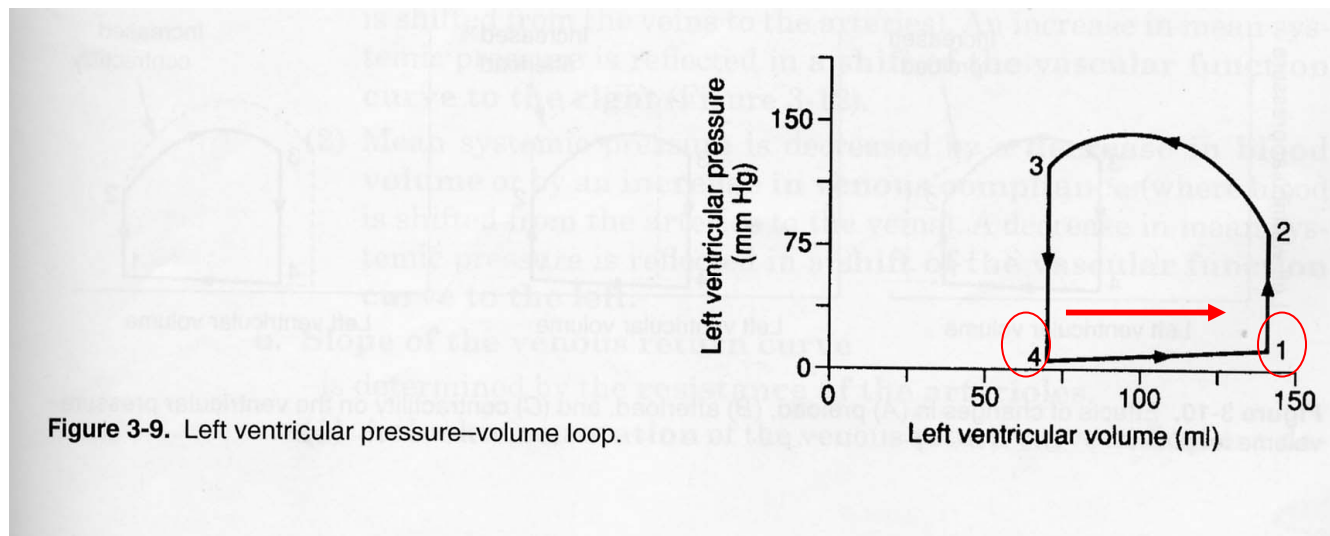


Figure 3-9. Left ventricular pressure–volume loop.

Фазе дијаграма притисак-волумен

4 —»1 (фаза пуњења). Чим притисак у левој комори падне испод вредности притиска у левој преткомори, долази до отварања митралне валвуле (AV) и процес пуњења коморе започиње. Током ове фазе количина крви у комори достиже вредност од око 120-140 ml (**енд-дијастолни волумен**).



Промене у облику криве притисак-волумен настају из више разлога.

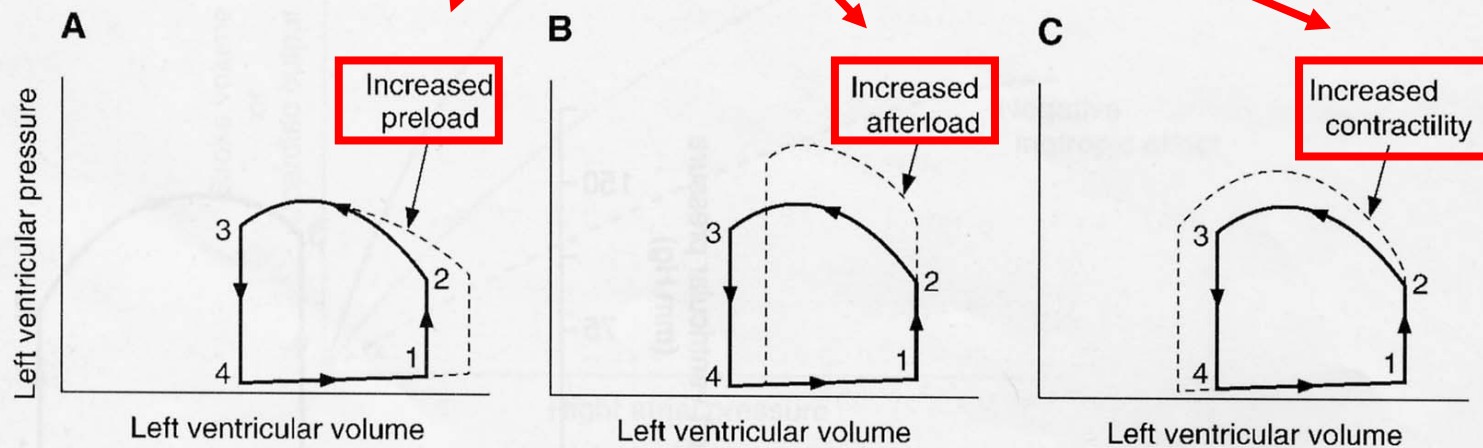


Figure 3-10. Effects of changes in (A) preload, (B) afterload, and (C) contractility on the ventricular pressure-volume loop.

Четири фактора који утичу на минутни волумен срца

(Минутни волумен срца је запремина крви коју срце испумпа током једног минута (у миру износи 4-6 L/min), једнака је производу ударног волумена и фреквенције срца)

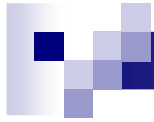
Фреквенција срца

Preload

Контрактилност

Afterload





Енергија срчане контракције:

масне киселине, глюкоза, лактати

Ефикасност срчане контракције:

Током контракције срчаног мишића, највећи део хемијске енергије се претвара у топлоту, а много мањи у сам рад мишића. Однос испољеног рада и утрошене хемијске енергије се зове ефикасност срчане контракције, или ефикасност срца. Максимална ефикасност нормалног срца је **20-25** %. Код срчане инсуфицијенције ефикасност срца може пасти чак на **5-10** %.

РЕГУЛАЦИЈА РАДА СРЦА

а) Ауторегулација срчаног рада (Frank-Starlingov закон)

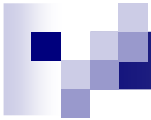


Otto Frank 1865 - 1944



Ernest Henry Starling 1866 –1927

б) Аутономни нервни систем (симпатички и парасимпатички нерви)



Ауторегулација срчаног рада

Frank-Starlingov закон:

У физиолошким границама срце ће испумпати сву крв која у њега дође, не дозвољавајући да се превелика количина крви накопља у венама.

-Код повећаног дотока крви мишић се више истегне а истегнути мишић (у физиолошким границама) ће се контраховати јачом силом, зато што су онда актински и миозински филаменти у оптималном степену преклапања за развој контракције.

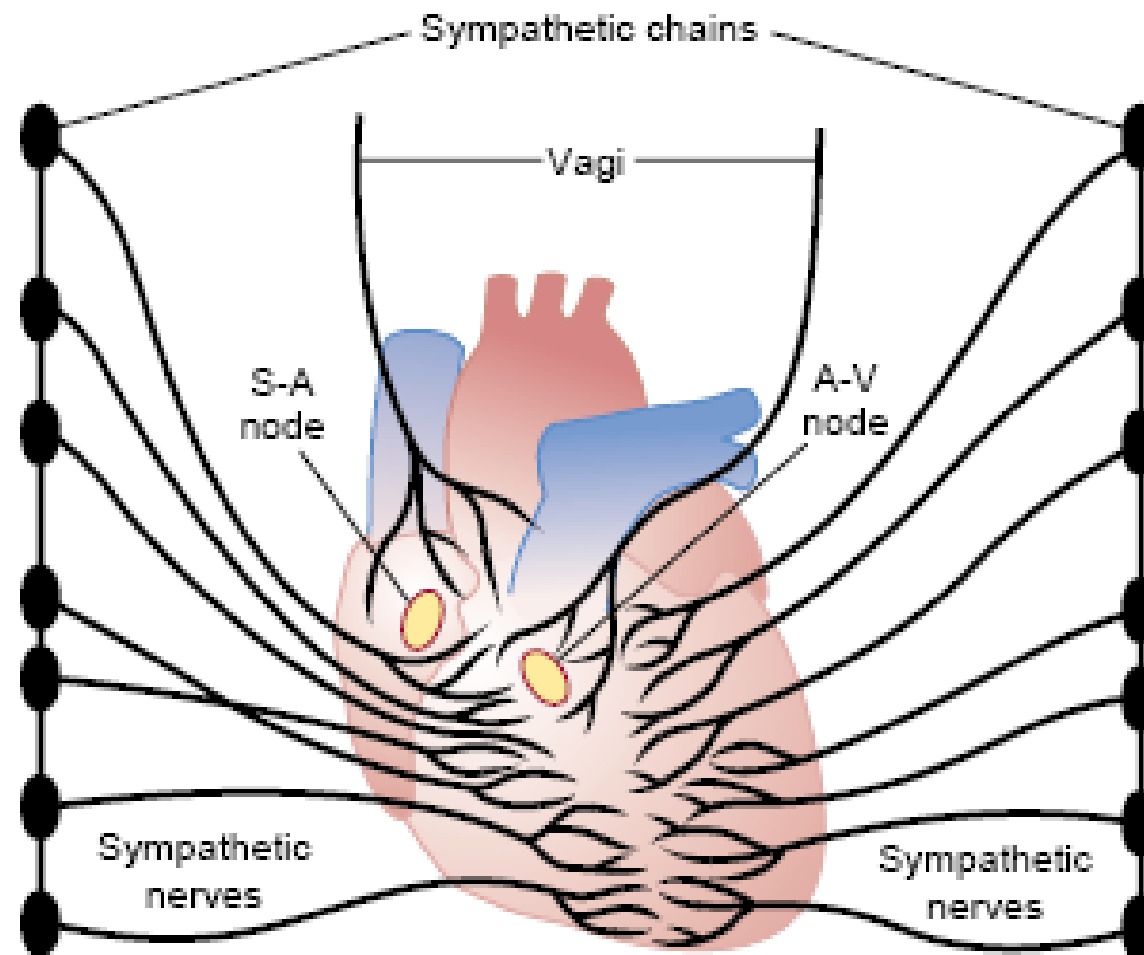
-Истезање зида десне преткоморе повећава срчану фреквенцију чак за 10-20%.

Аутономни нервни систем

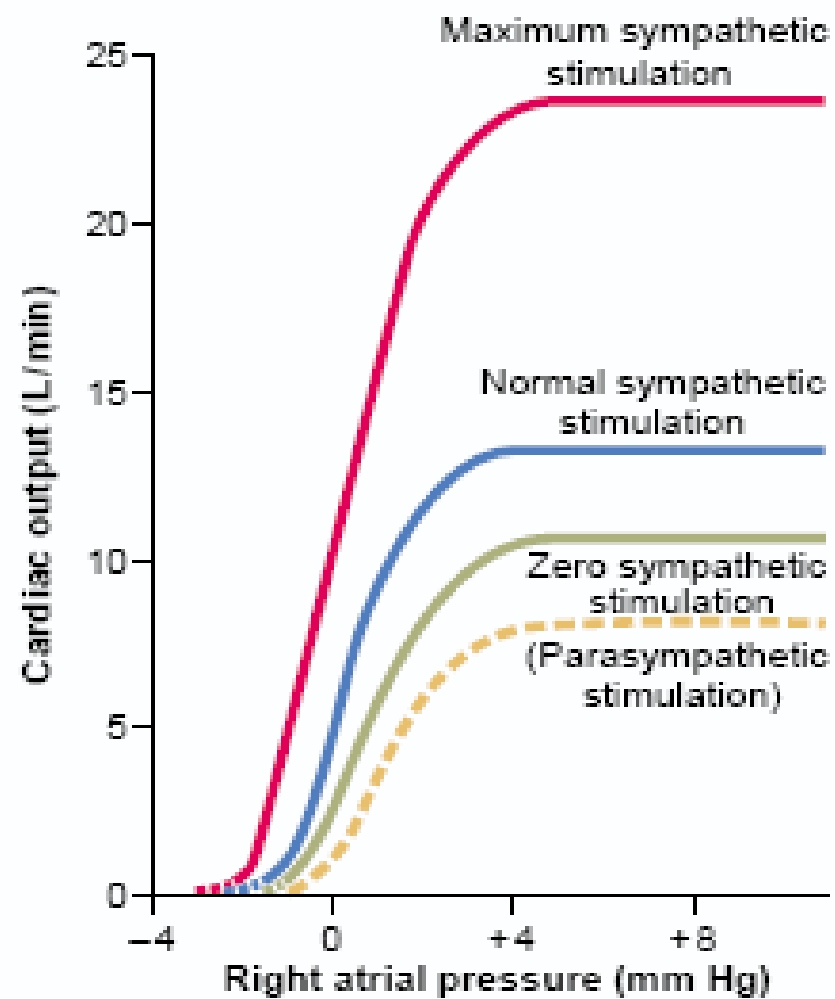
(симпатички и парасимпатички нерви)

- контрола фреквенције и снаге срчане контракције

Аутономни нервни систем



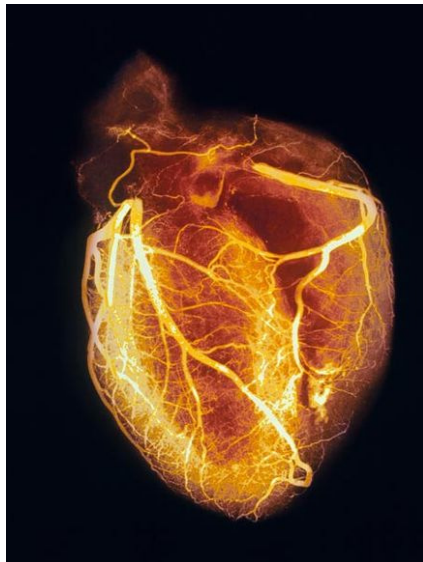
Симпатичка и парасимпатичка инервација на срцу.



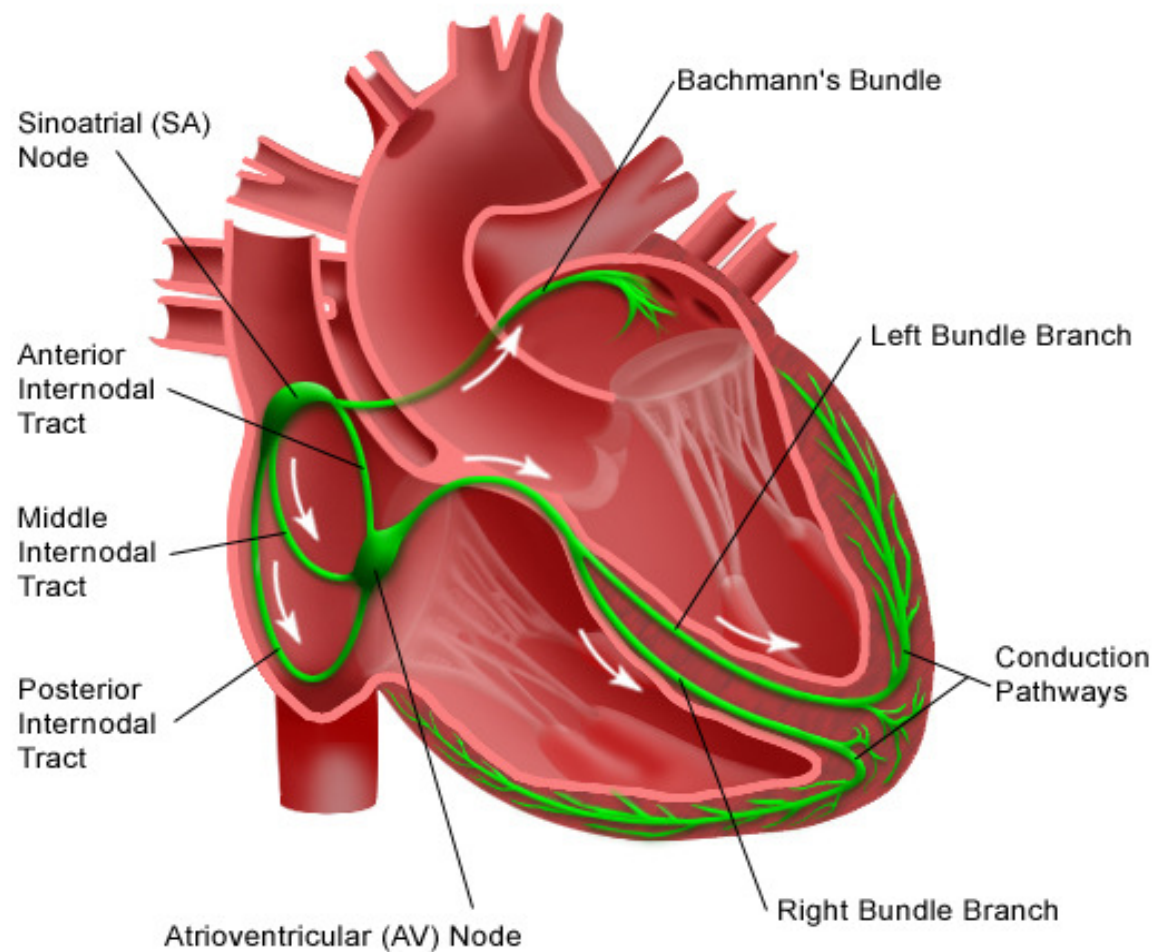
Утицај различитог степена стимулације симпатикуса и парасимпатикуса на криву минутног волумена срца.

ФИЗИОЛОГИЈА

■ РИТМИЧКА ЕКСЦИТАЦИЈА СРЦА



Спроводни систем срца



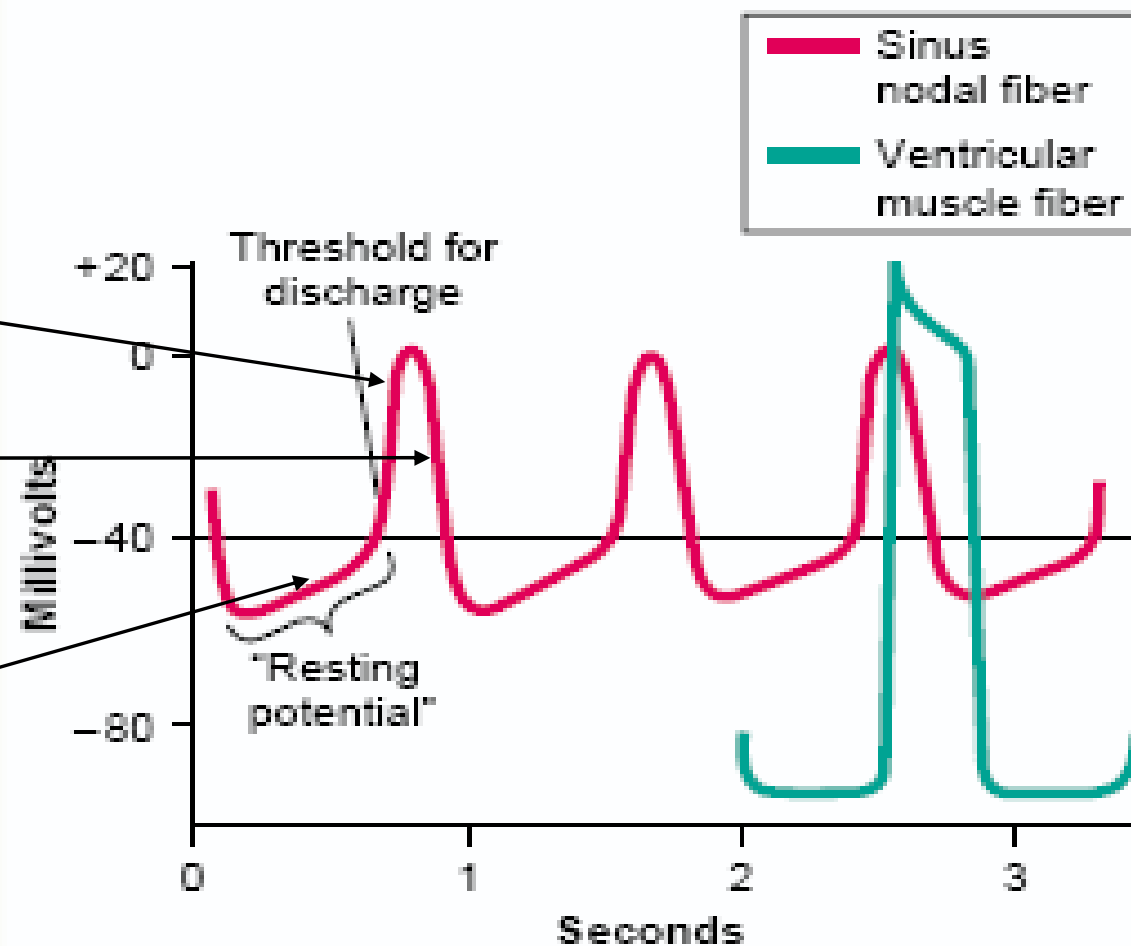
Синусни чвор и Пуркињев систем у срцу. Приказани су и А-В чвор, преткоморски интернодусни путеви и коморске гране снопа.




ДЕПОЛАРИЗАЦИЈА –
ФАЗА '0' АКЦИОНОГ ПОТЕНЦИЈАЛА

РЕПОЛАРИЗАЦИЈА –
ФАЗА '3' АКЦИОНОГ ПОТЕНЦИЈАЛА

НЕСТАБИЛАН МИРОВНИ
МЕМБРАНСКИ ПОТЕНЦИЈАЛ
ИЛИ ПРЕПОТЕНЦИЈАЛ (PP) –
ФАЗА '4' АКЦИОНОГ ПОТЕНЦИЈАЛА



Ритмичко одашиљање импулса влакна синусног чвора. Такође је акциони потенцијал синусног чвора упоређен са акционим потенцијалом мишићног влакна коморе.



Брзина фазе 4 (нестабилан мировни мембрански потенцијал-спонтана деполаризација) је највећа у SA чвору (значи фаза 4 најкраће траје) и најспорија у Хис-Пуркиње систему:

SA чвор > AV чвор > Хис-Пуркиње

Зато је SA чвор **предводник** срчаног ритма у нормалним физиолошким условима.

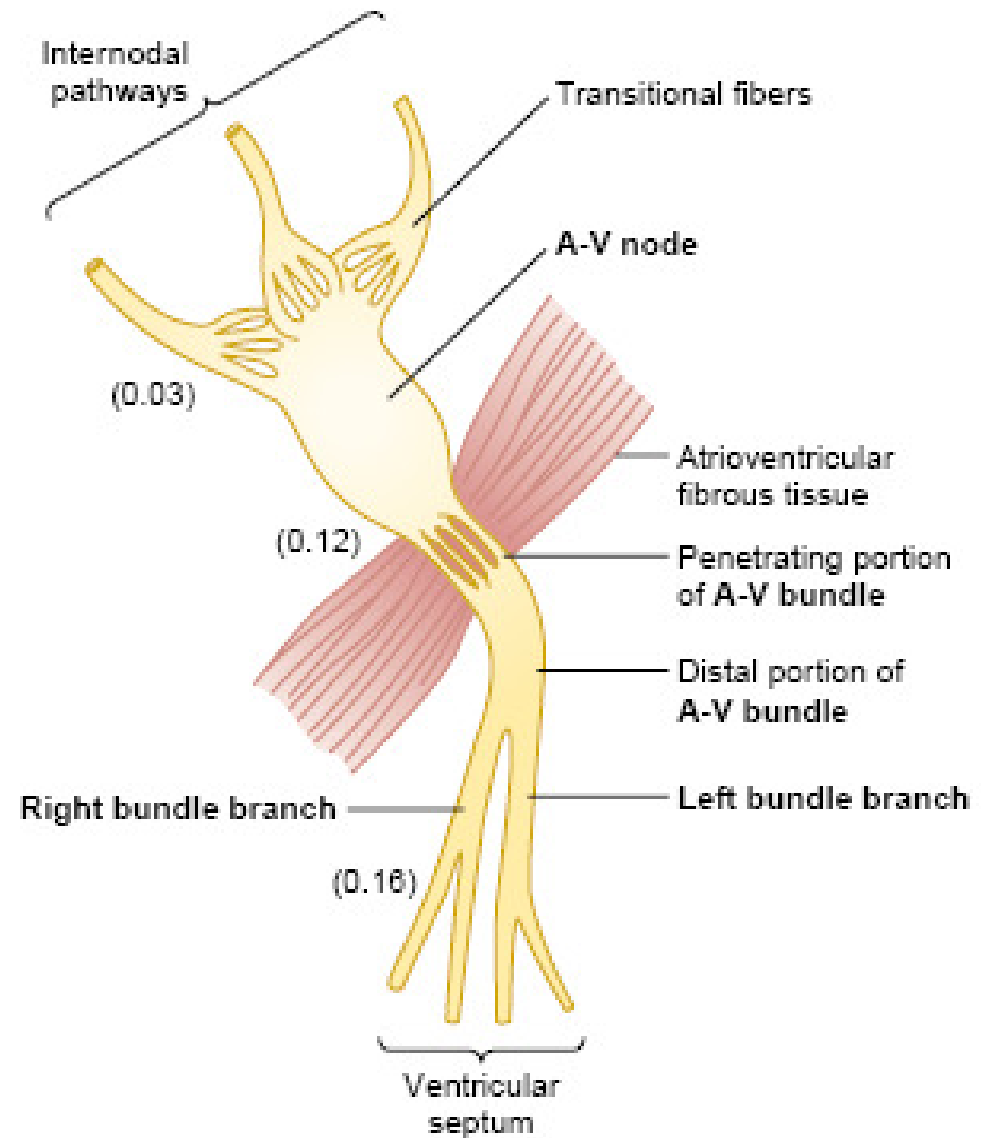
У неким (абнормалним) условима други делови срца могу ритмички да стварају импулсе, баш као и влакна SA чвора. Ако се предводник који одашиље импулсе највећом учесталошћу налази било где изван синусног чвора, назива се **ектопичан** предводник срчаног ритма.

Брзина којом се стварају импулси у појединим деловима спроводног система срца:

SA чвор :	60-100 импулса/минут
AV чвор :	40-60 импулса/минут
Пуркињев систем:	15-40 импулса/минут

Брзина провођења

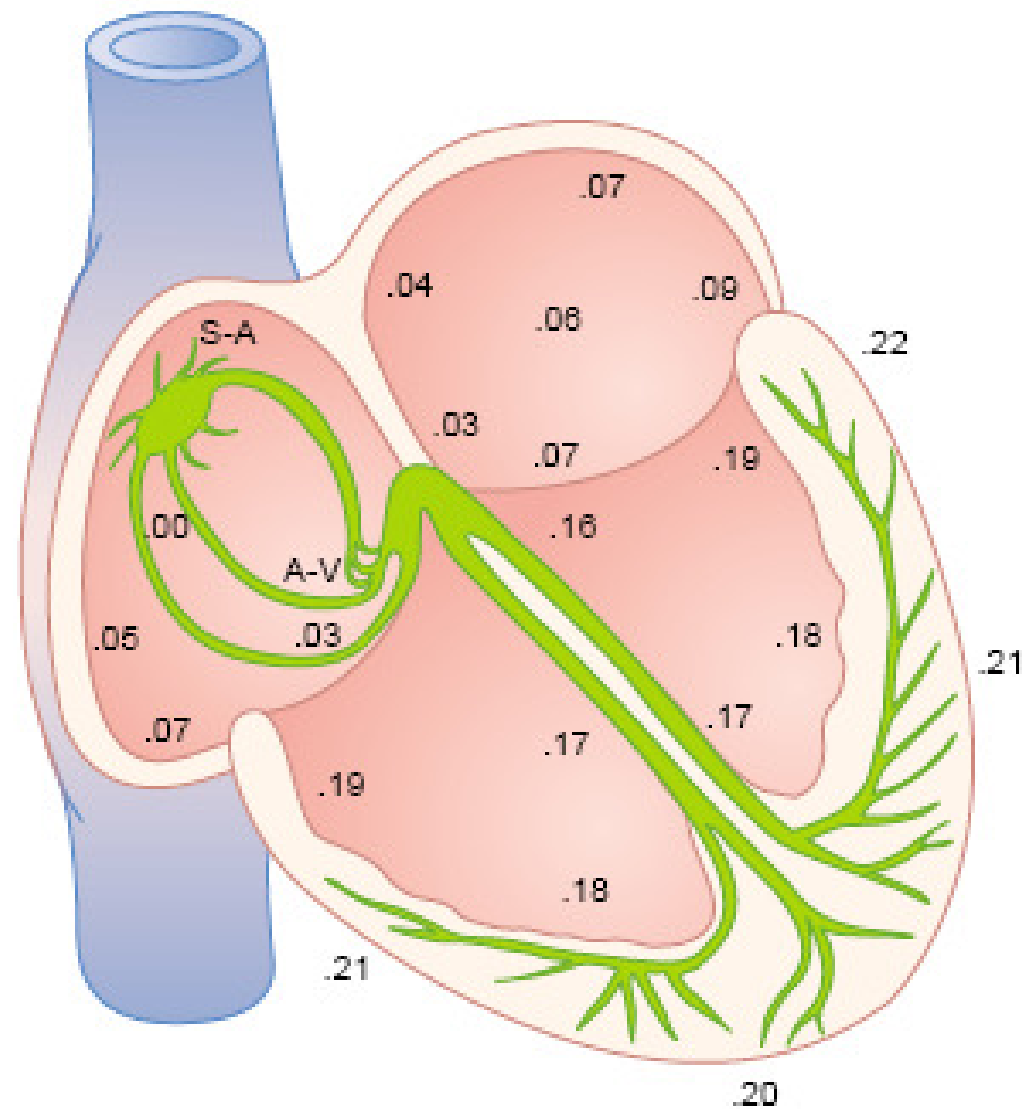
-је најмања у **AV чвору**
(видети PR интервал
ЕКГ-а), допушта да се коморе
напуне пре него што наступи
њихова контракција. Ако је
брзина провођења кроз AV
чвор повећана, пуњење
комора може бити смањено



Брзина провођења

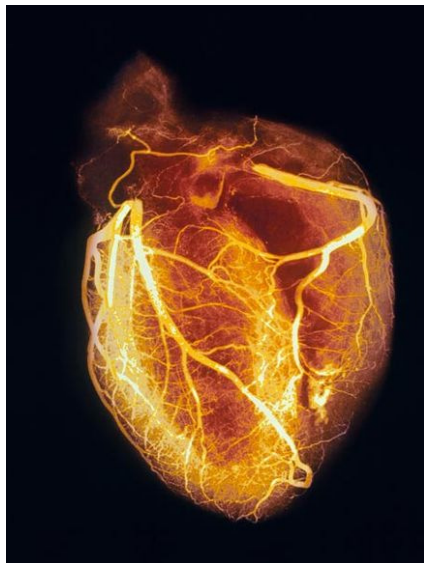
- Приказује време које је потребно да би се ексцитација проширила кроз срчано ткиво.

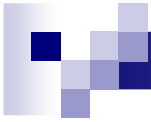
- је **највећа у Пуркиње систему** (1.5–4 m/s, мања кроз интернодусне путеве 1 m/s, а још спорија у кардиомиоцитима 0,3 m/s).



ФИЗИОЛОГИЈА

■ АУТОНОМНИ ЕФЕКТИ НА СРЦУ






Аутономни ефекти на срцу:

Хронотропни ефекти

Дромотропни ефекти

Инотропни ефекти

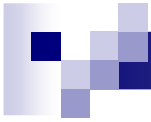
Батмотропни ефекти



Дефиниције хронотропних и дромотропних ефеката

а. Хронотропни ефекти

- Доводе до промена срчаног ритма (фреквенције срца).
- **Негативни хронотропни ефекат** је смањење срчаног ритма (фреквенције срца) које настаје услед смањења брзине окидања (паљења) SA чвора.
- **Позитивни хронотропни ефекат** је повећања брзине срчаног ритма (фреквенције срца) повећавањем брзине окидања у SA чвору.

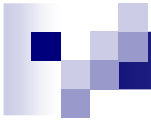


6. Дромотропни ефекти

-су промене у брзини провођења, примарно у AV чвору.

-**Негативни дромотропни ефекат** је смањење брзине провођења кроз AV чвор, успорава се провођење акционих потенцијала од преткомора до комора и продужава PR интервал.

- **Позитивни дромотропни ефекат** представља повећање брзине провођења кроз AV чвор, убрзава се провођење акционих потенцијала од преткомора до комора и скраћује PR интервал



Контрактилност

-је унутрашње својство срчаног мишића да развије силу за дату дужину мишића.

- То се другачије зове инотропизам.

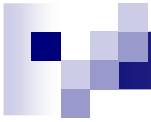
-зависи од интрацелуларне концентрације Ca^{2+} .

(подсетимо се да интрацелуларни Ca^{2+} у срчаном мишићу потиче једним делом из екстрацелуларног простора а другим делом из саркоплазматског ретикулума).

в. Инотропни ефекти

-Позитивни инотропни фактори изазивају повећање контрактилности – *симпатички нервни систем, кардиотонички гликозиди* .

-Негативни инотропни фактори изазивају смањење контрактилности – *парасимпатички нервни систем*.



г. Батмотропни ефекти

- Доводе до промена у надражљивости срчаног ткива.
- Негативни батмотропни ефекат** је смањење надражљивости срчаних ћелија – *парасимпатички нервни систем*.
- Позитивни батмотропни ефекат** је повећање надражљивости срчаних ћелија – *симпатички нервни систем*.

ЕЛЕКТРОКАРДИОГРАМ (ЕКГ)

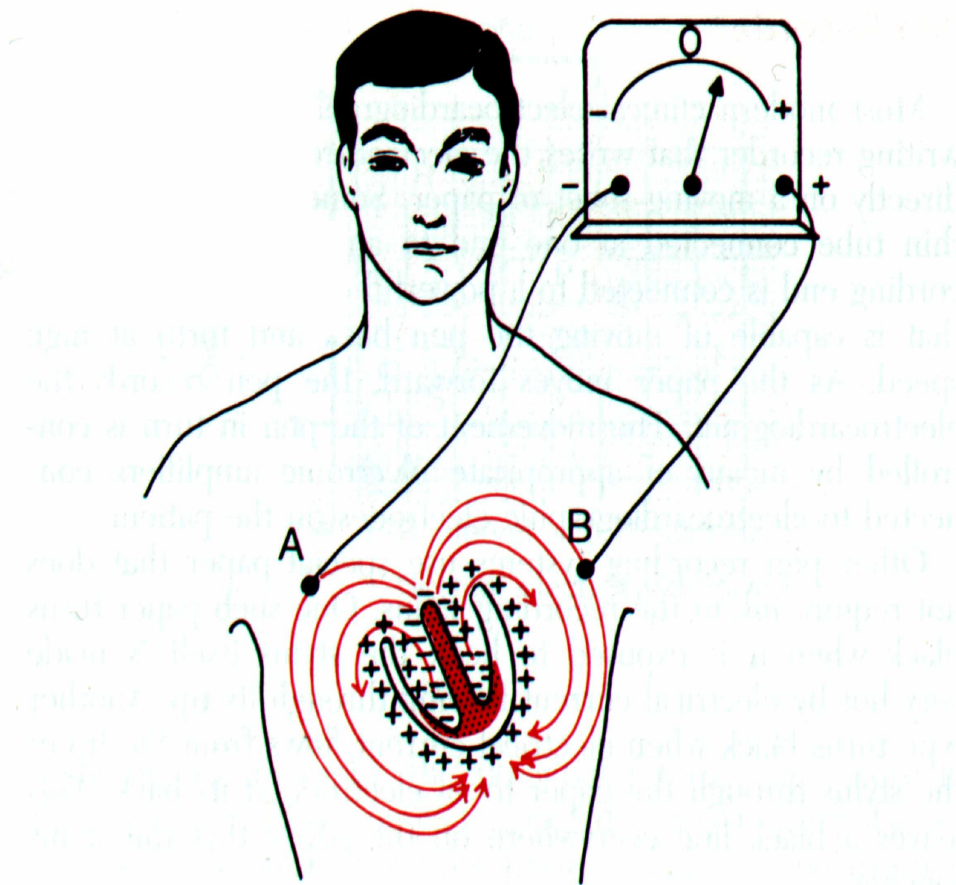
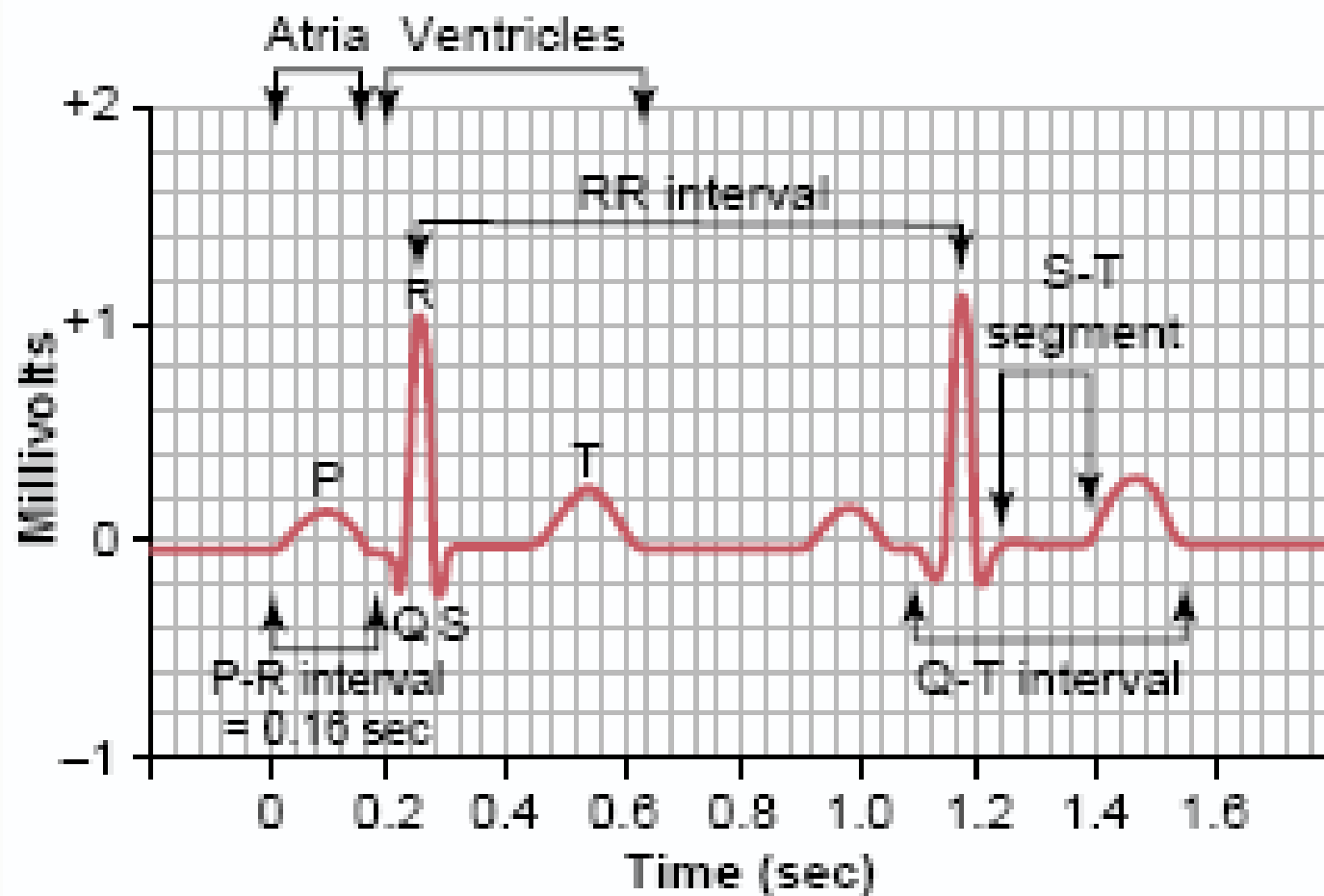
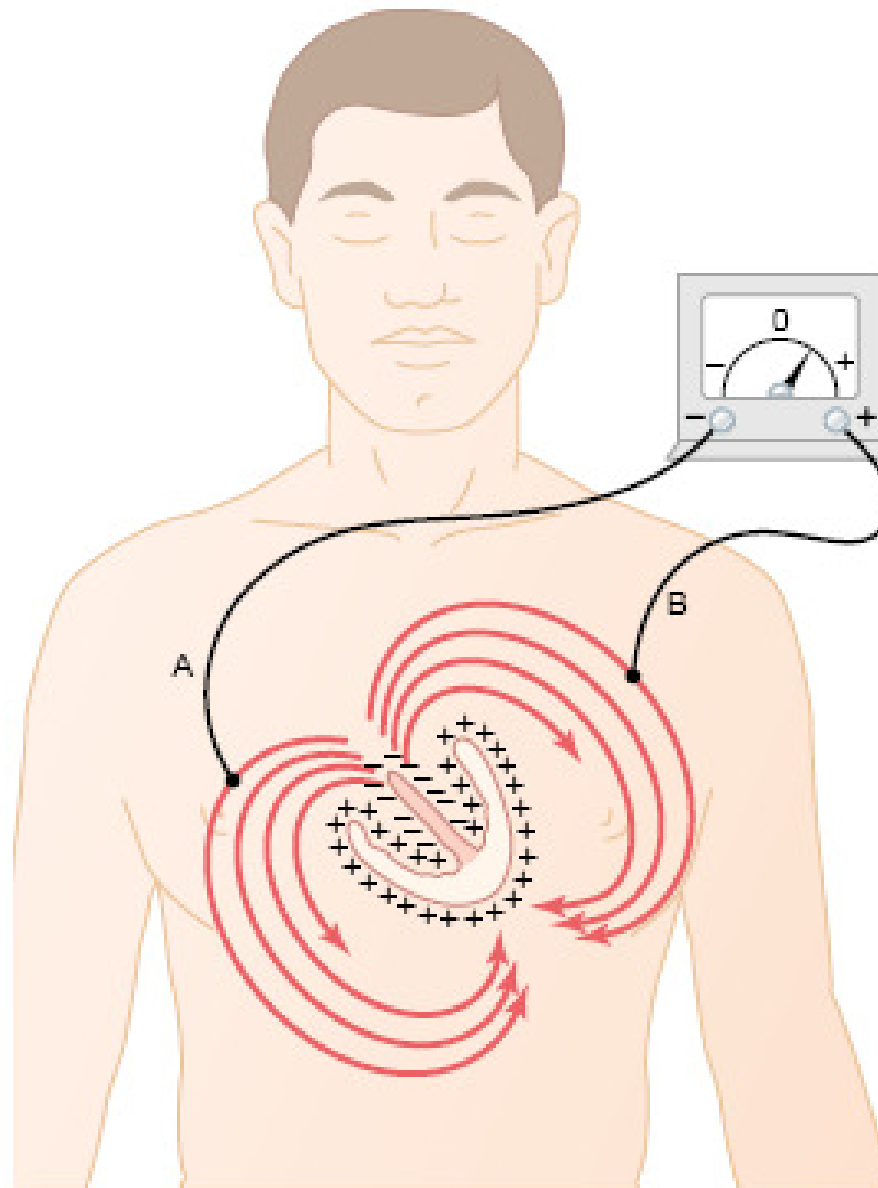


Figure 11-5. Flow of current in the chest around partially depolarized ventricles.



Нормалан електрокардиограм



Ток струје у грудном кошу око делимично деполаризованих комора.

Делови ЕКГ – а:

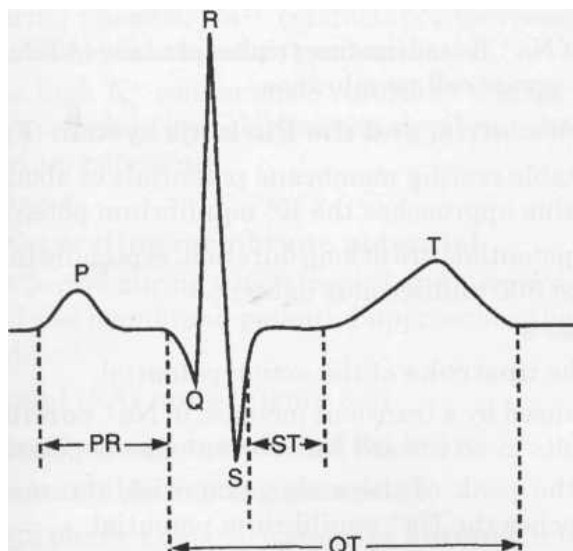
Р талас

-представља деполаризацију преткомора
(не обухвата реполаризацију преткомора, која је "сакривена" у QRS комплексу)

- ако постоји → синусни ритам (из SA чвора),
- ако не постоји → нодални ритам (из AV чвора); трајање 0,05-0,12s

PQ сегмент

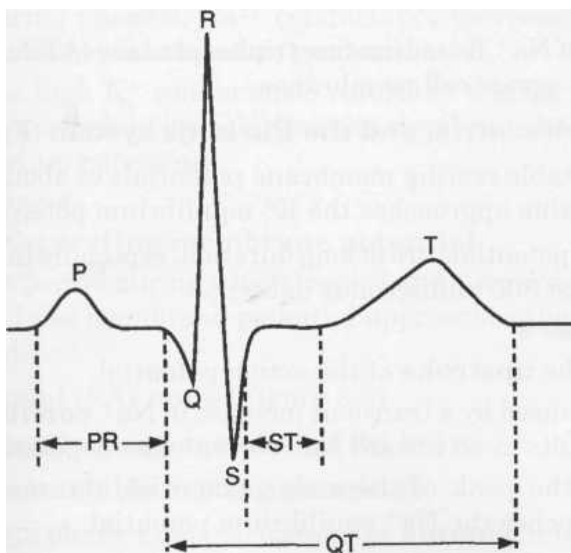
- провођење (успоравање) импулса кроз AV чвор (изоелектричан)



Нормални електрокардиограм измерен II одводом

PQ интервал (PR интервал*)

- деполаризација преткомора, провођење импулса кроз AV чвор; трајање 0,16-0,20s
- је интервал од почетка "P" таласа до почетка "Q" зупца QRS комплекса (од почетка деполаризације преткомора до почетка деполаризације комора).



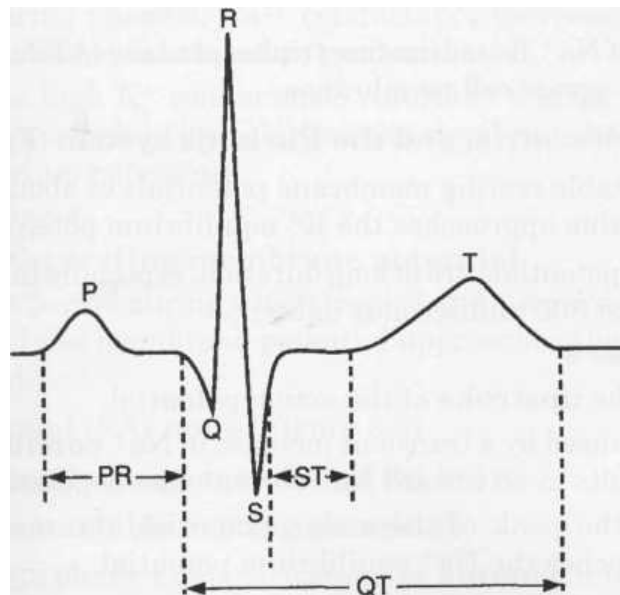
* Често се у нормалном ЕКГ-у када недостаје Q зубац PQ интервал назива и PR интервал.

QRS комплекс

- деполяризація комора (представља преношење імпульса од АВ чвора дуж спроводног система комора)

"QT" інтервал

- је інтервал од почетка "Q" таласа до краја "T" таласа.
- представља целокупан период деполяризації і реполяризації комора (целокупну електричну активност комора); трајање 0,35-0,42s

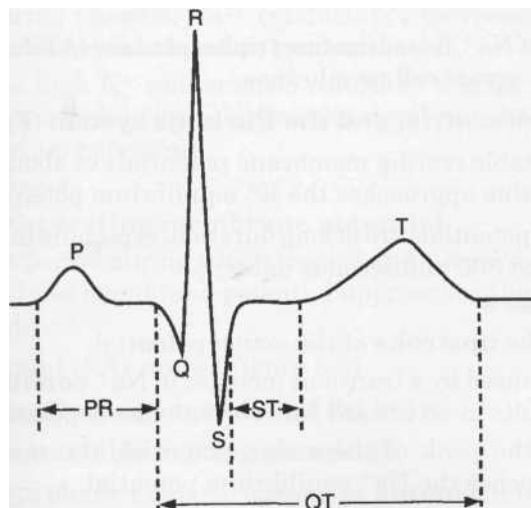


" ST " сегмент

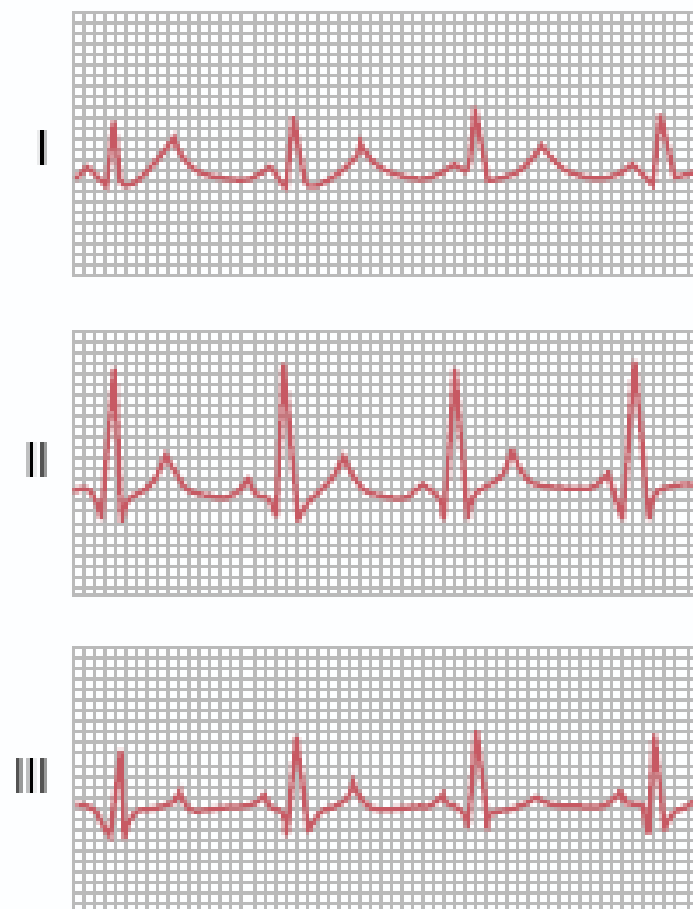
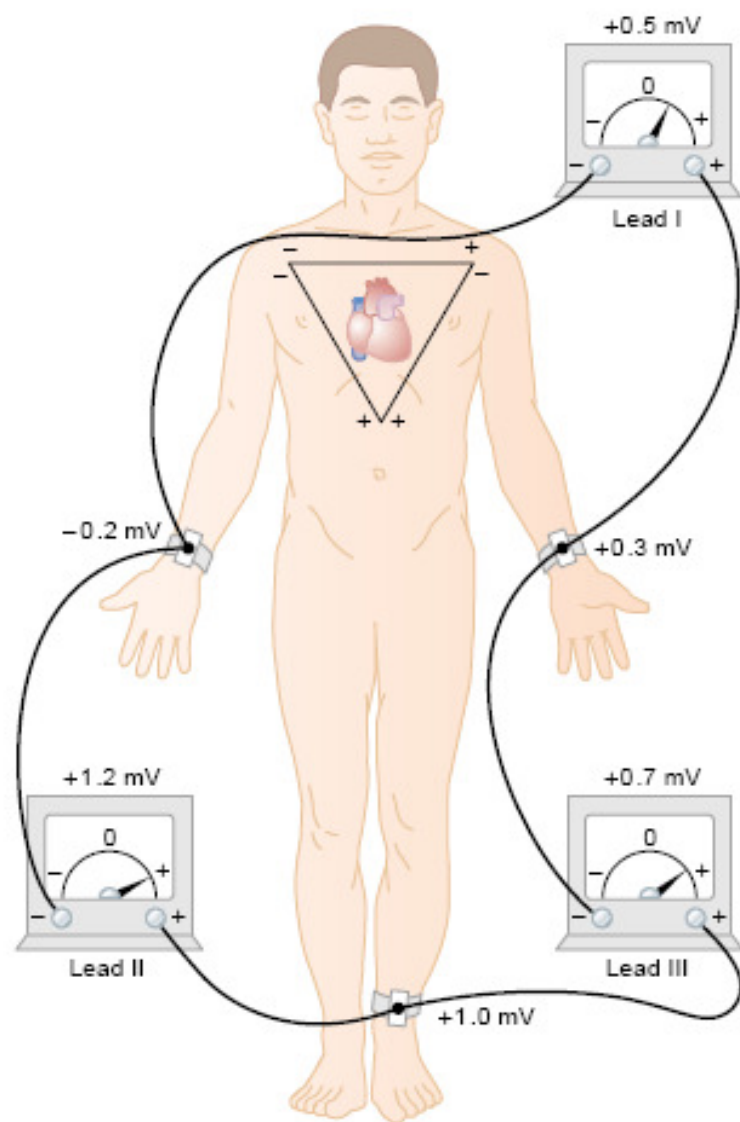
- је сегмент од краја "S" таласа до почетка "T" таласа.
- изоелектричан је .
- представља период када су коморе деполяризоване.

" T " талас

- представља реполаризацију комора; трајање 0,16-0,25s

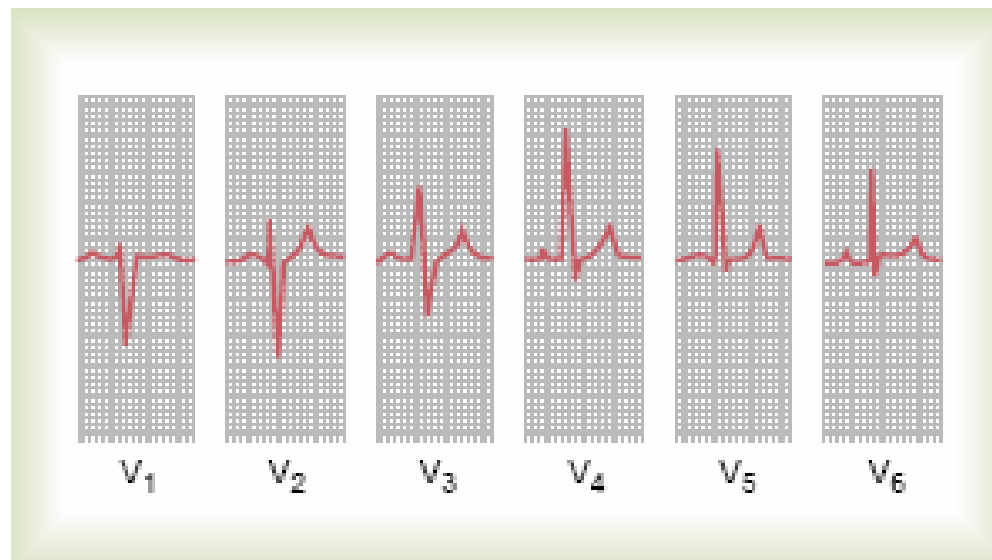
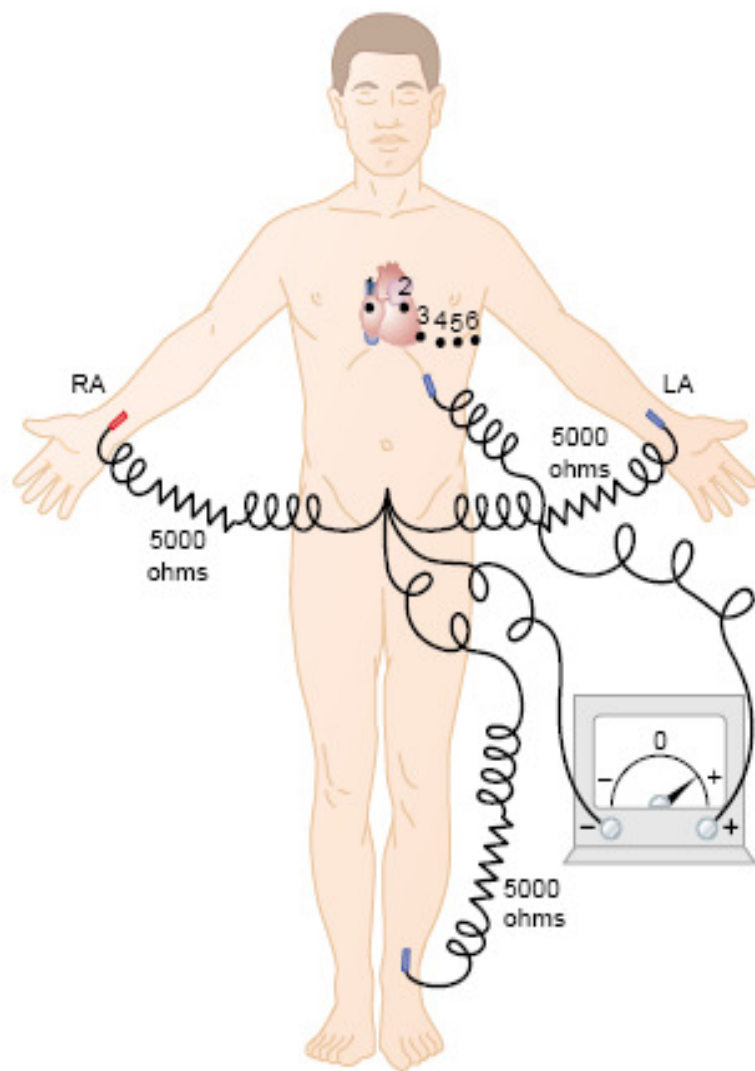


СТАНДАРДНИ БИПОЛАРНИ ОДВОДИ СА ЕКСТРЕМИТЕТА



Распоред електрода за регистровање у стандардним ЕКГ одводима (лево) и Нормалан запис у три стандардна ЕКГ одвода (десно).

СТАНДАРДНИ ОДВОДИ СА ГРУДНОГ КОША ПРЕКОРДИЈАЛНИ ОДВОДИ



Везе између тела и електрокардиографа за регистровање у прекордијалним одводима (лево).

Нормални електрокардиограми регистровани у шест стандардних прекордијалних одвода (горе).

ПОЈАЧАНИ УНИПОЛАРНИ ОДВОДИ СА ЕКСТРЕМИТЕТА

-Два екстремитета су повезана преко електричног отпорника са негативним полем електрокардиографа, а трећи екстремитет се повезује са позитивним полем.

У зависности од позиције позитивног краја означени су као **aVR** (right – десна рука), **aVL** (left – лева рука) и **aVF** (foot – лева нога).

