

# Boyuna Demet Dinamiği

Veli YILDIZ  
4 Őubat 2015  
HPFBU

# Kuvvet - momentum

## Lorentz Kuvveti

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- $\vec{F}$  : Kuvvet
- $\vec{v}$  : Hız
- $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$  : Momentum
- $q$  : Yük
- $\vec{E}$  : Elektrik alan
- $\vec{B}$  : Manyetik alan

## Sadece elektrik alan varsa

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{E}$$

Hızlanma için ideal durum  $\vec{p}$  ve  $\vec{E}$  nin paral ve aynı yönde olduğu durumdur. Böylece momentum değişimi ( $\Delta\vec{p}$ ) momentum yönünde olur. Hızın yönü değişmez sadece büyüklüğü artar.

## Sadece manyetik alan varsa

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

Manyetik kuvvet her zaman hızın yönüne diktir ve hızın büyüklüğünü değiştirmez, sadece yönünü değiştirir!

# Özel görelilik

$$E = mc^2$$

- Kütle:  $m$
- Momentum:  $p$
- Kütle enerjisi:  $E_0$
- Kinetik enerji:  $KE$
- Toplam enerji:  $E_{toplam}$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^2}}$$

$$p = \gamma m v$$

$$E_0 = mc^2$$

$$KE = (\gamma - 1)mc^2$$

$$E_{toplam} = \gamma mc^2$$

## Birimler

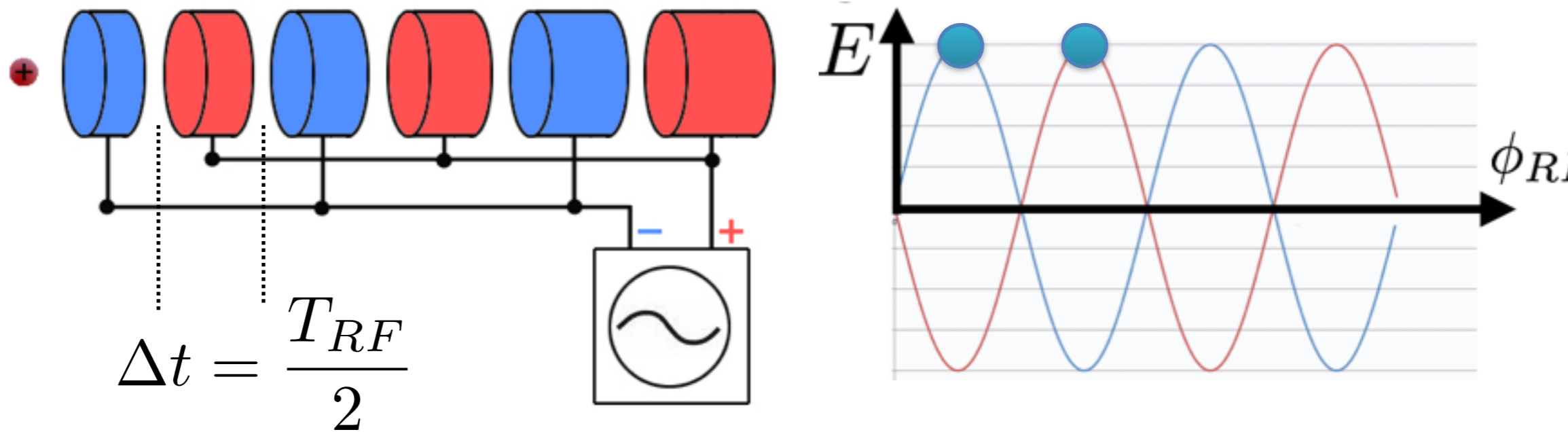
- Enerji: eV
- Momentum: eV/c
- Kütle: eV/c<sup>2</sup>

# Faz kararlılığı, Eşzamanlılık

- Tek bir parçacık hızlandırdığımızı düşünelim,
- Bu parçacığı ard arda hızlandırıcı boşluklarından geçirelim ve hep aynı RF fazını hissetmesini sağlayalım.
- Parçacığın hızı, hızlandırıcı hücrelerinin uzunluğu arasında nasıl bir ilişki olmalı?

# Faz kararlılığı Eşzamanlılık

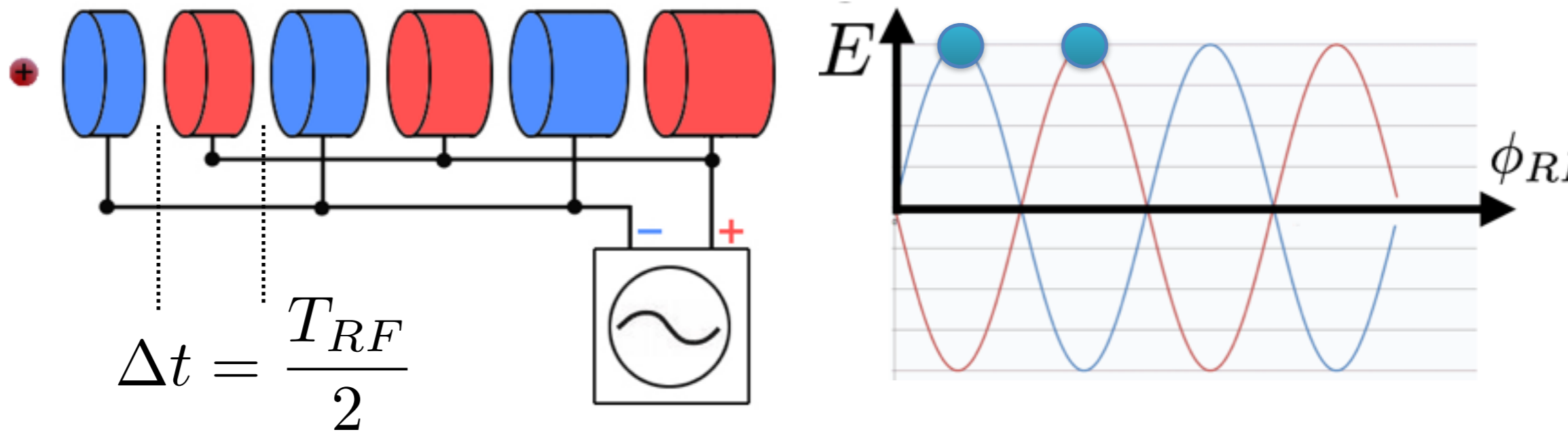
- Wideroe doğrusal hızlandırıcı ( $\pi$ -kip)



$$L_{hucure} = \frac{\beta \lambda}{2} \quad \text{Hız arttıkça, eşzamanlılığın sağlanması için hücre boyu da artmalı}$$

# Faz kararlılığı Eşzamanlılık

- Wideroe doğrusal hızlandırıcı ( $\pi$ -kip)

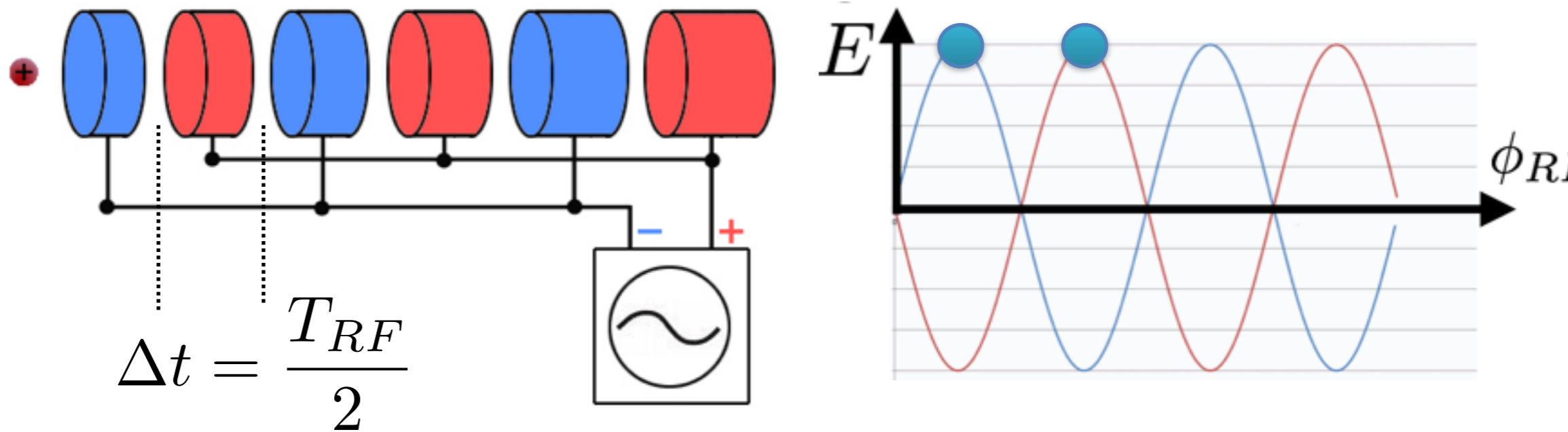


$$L_{hucure} = \frac{\beta \lambda}{2}$$

Hız arttıkça, eşzamanlılığın sağlanması için hücre boyu da artmalı

# Faz kararlılığı Eşzamanlılık

- Wideroe doğrusal hızlandırıcı ( $\pi$ -kip)

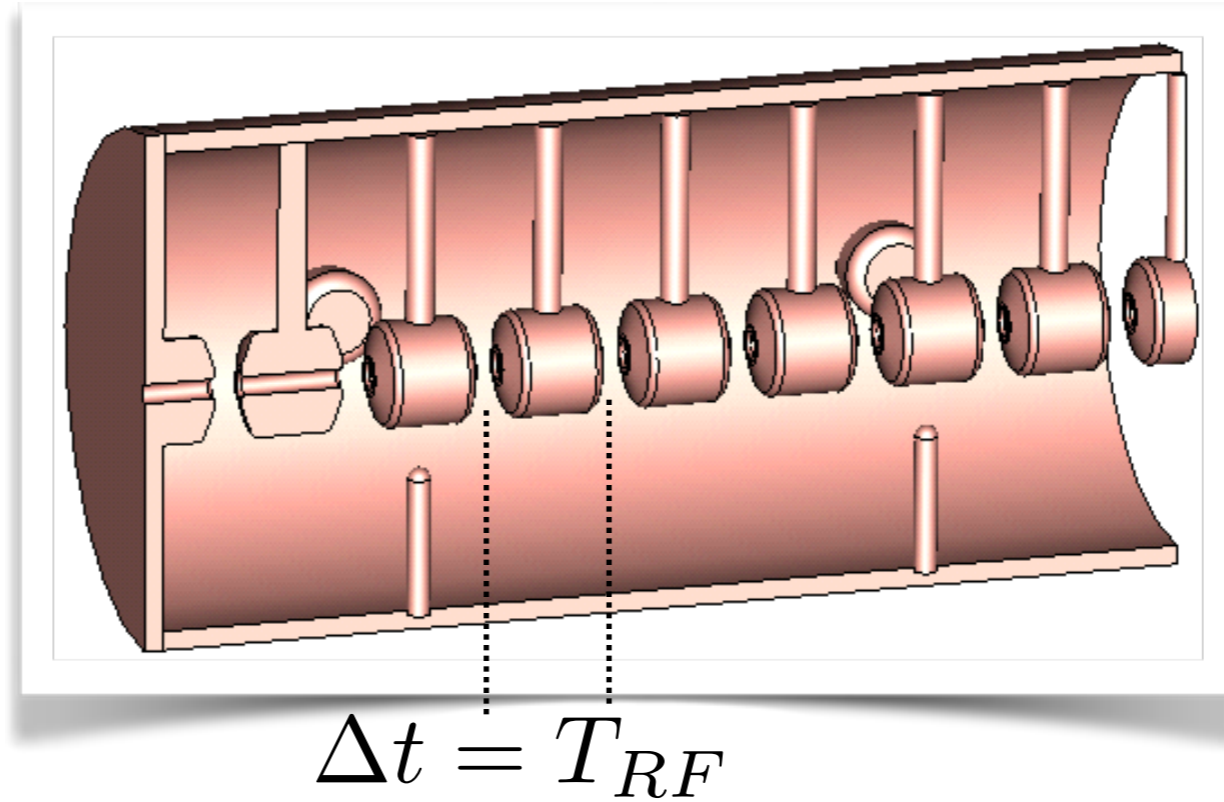


$$L_{hucure} = \frac{\beta \lambda}{2}$$

Hız arttıkça, eşzamanlılığın sağlanması için hücre boyu da artmalı

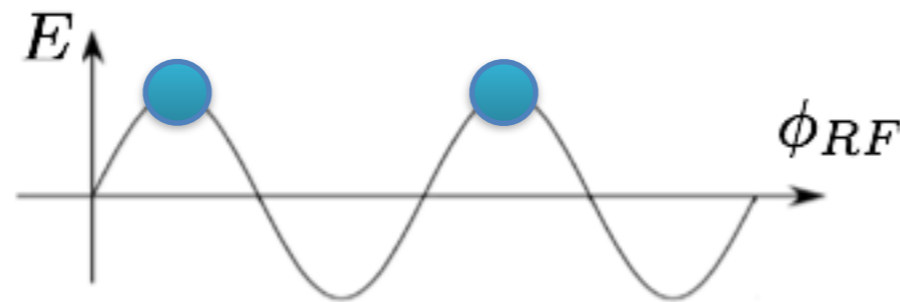
# Faz kararlılığı Eşzamanlılık

- DTL (0-kip)



$$L_{hucres} = \beta \lambda$$

Hız arttıkça, eşzamanlılığın sağlanması için hücre boyu da artmalı





# Eşzamanlayıcıda eşzamanlılık

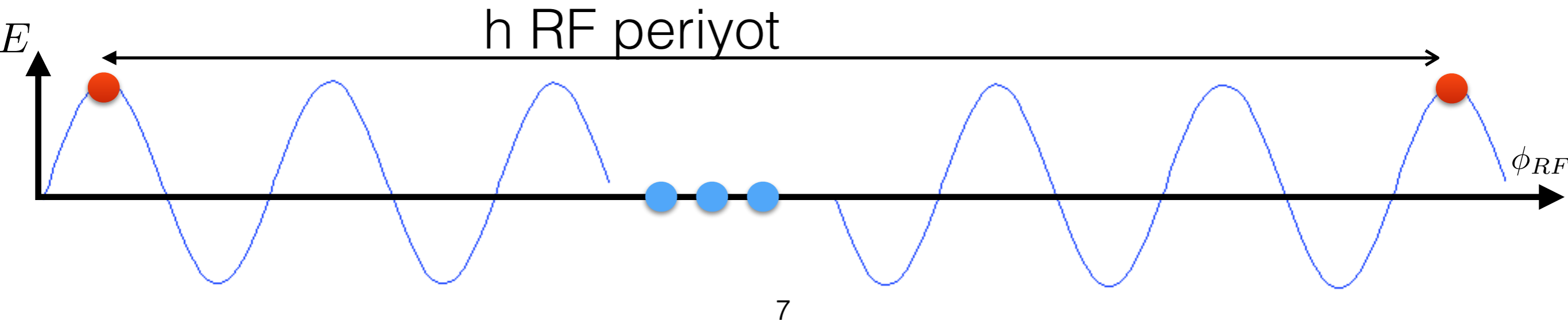
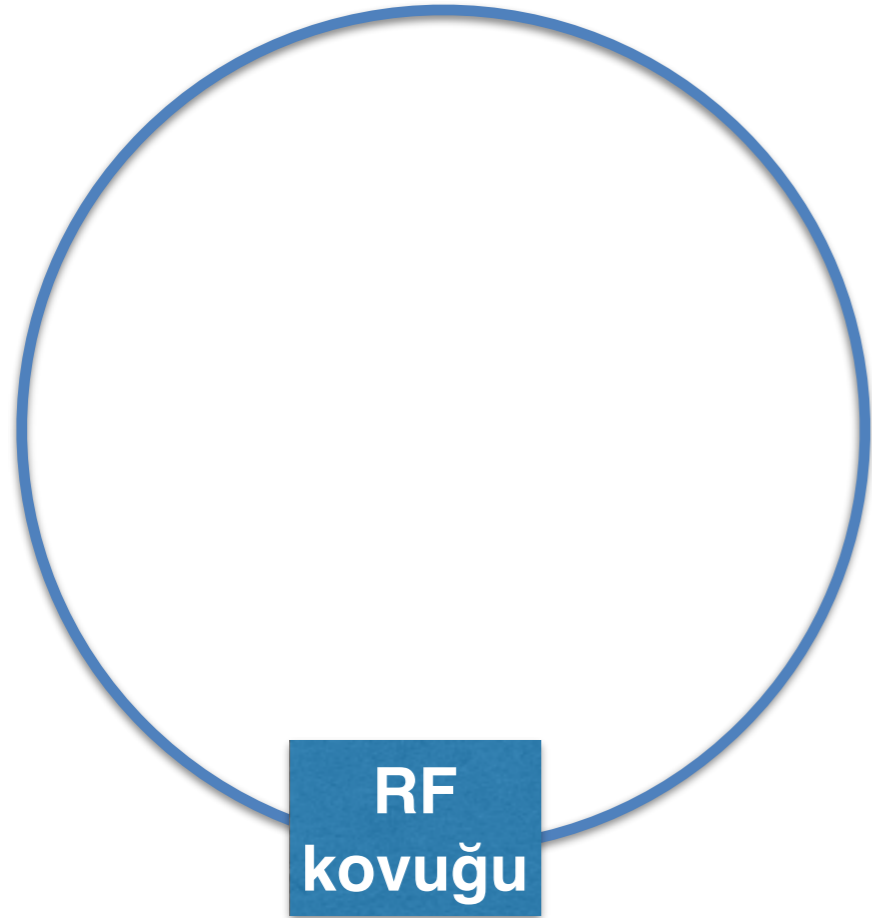
Ard arda hızlandırıcı boşlukları olmasa bile, eşzamanlı parçacık hızlandırıcı etrafında dönüp tekrar RF kovuğuna geliyor. Eşzamanlılık gerekli!!!

$$T_{donme} = hT_{RF}$$

$$f_{RF} = hf_{donme}$$

RF frekansı dönme frekansının tam katı olmalı.

**h**:harmonik sayı (harmonic number)

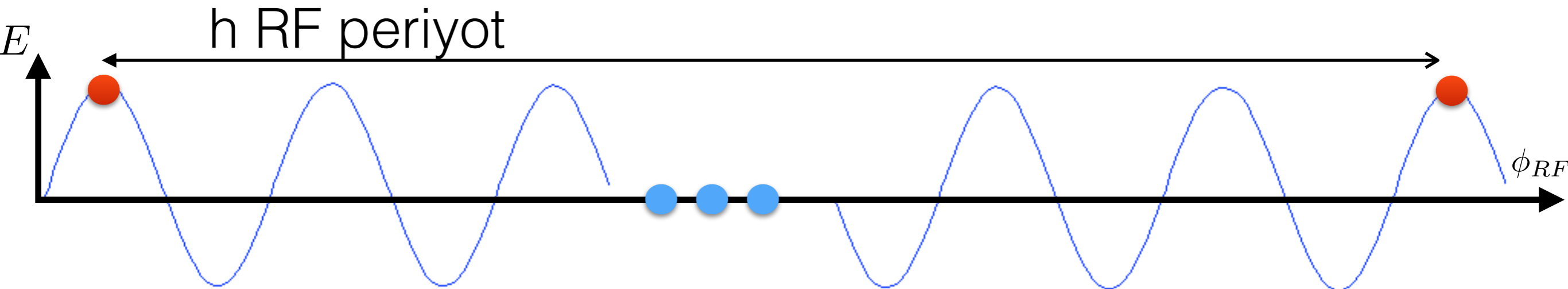


# Eşzamanlayıcıda eşzamanlılık

Soru: Eşzamanlılığı sağlamak için doğrusal hızlandırıcılarda hücre boyunu uzatıyoruz. Şimdi ne yapalım?



$$f_{RF} = h f_{donme}$$



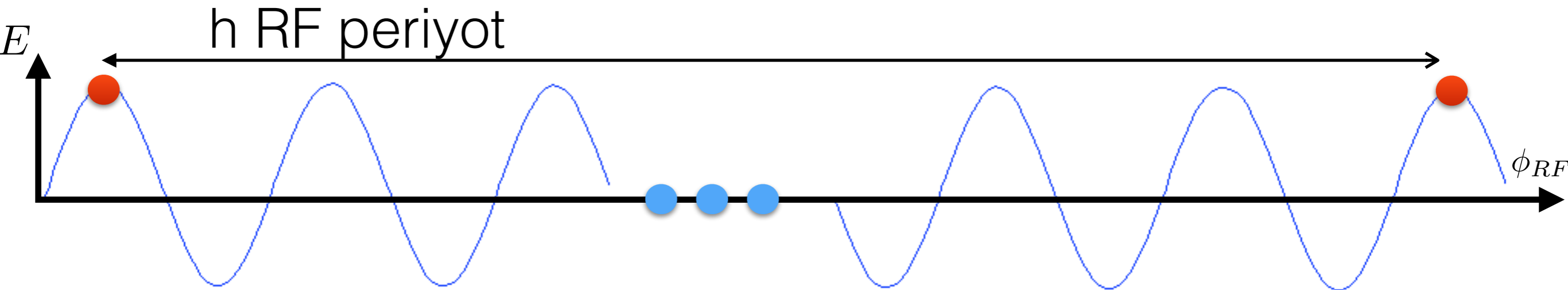
# Eşzamanlayıcıda eşzamanlılık



Soru: Eşzamanlılığı sağlamak için doğrusal hızlandırıcılarda hücre boyunu uzatıyoruz. Şimdi ne yapalım?

Hızlandıkça dönme frekansı artıyor. Eşzamanlılığı korumak için RF frekansı arttırılmalı. Soru: Frekansı Ne kadar değiştirebiliyoruz?

$$f_{RF} = h f_{donme}$$



# Eşzamanlayıcıda eşzamanlılık

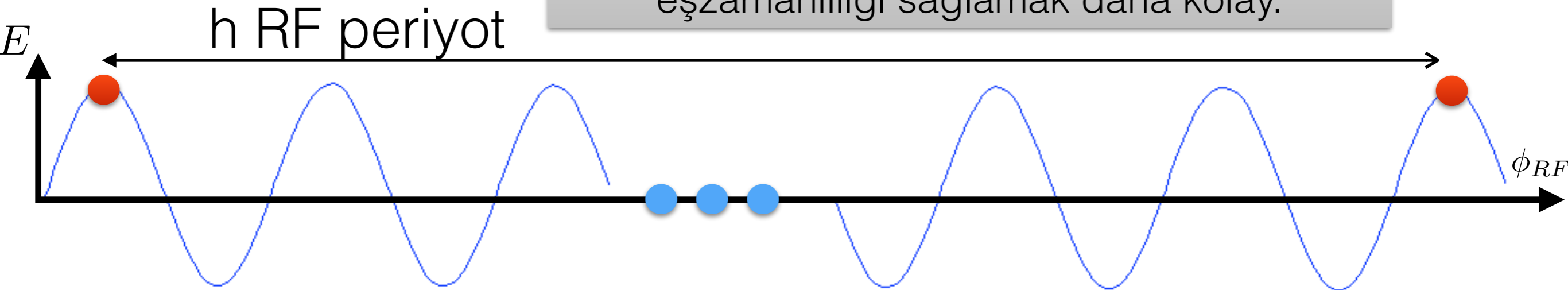


Soru: Eşzamanlılığı sağlamak için doğrusal hızlandırıcılarda hücre boyunu uzatıyoruz. Şimdi ne yapalım?

Hızlandıkça dönme frekansı artıyor. Eşzamanlılığı korumak için RF frekansı arttırılmalı. Soru: Frekansı Ne kadar değiştirebiliyoruz?

$$f_{RF} = h f_{donme}$$

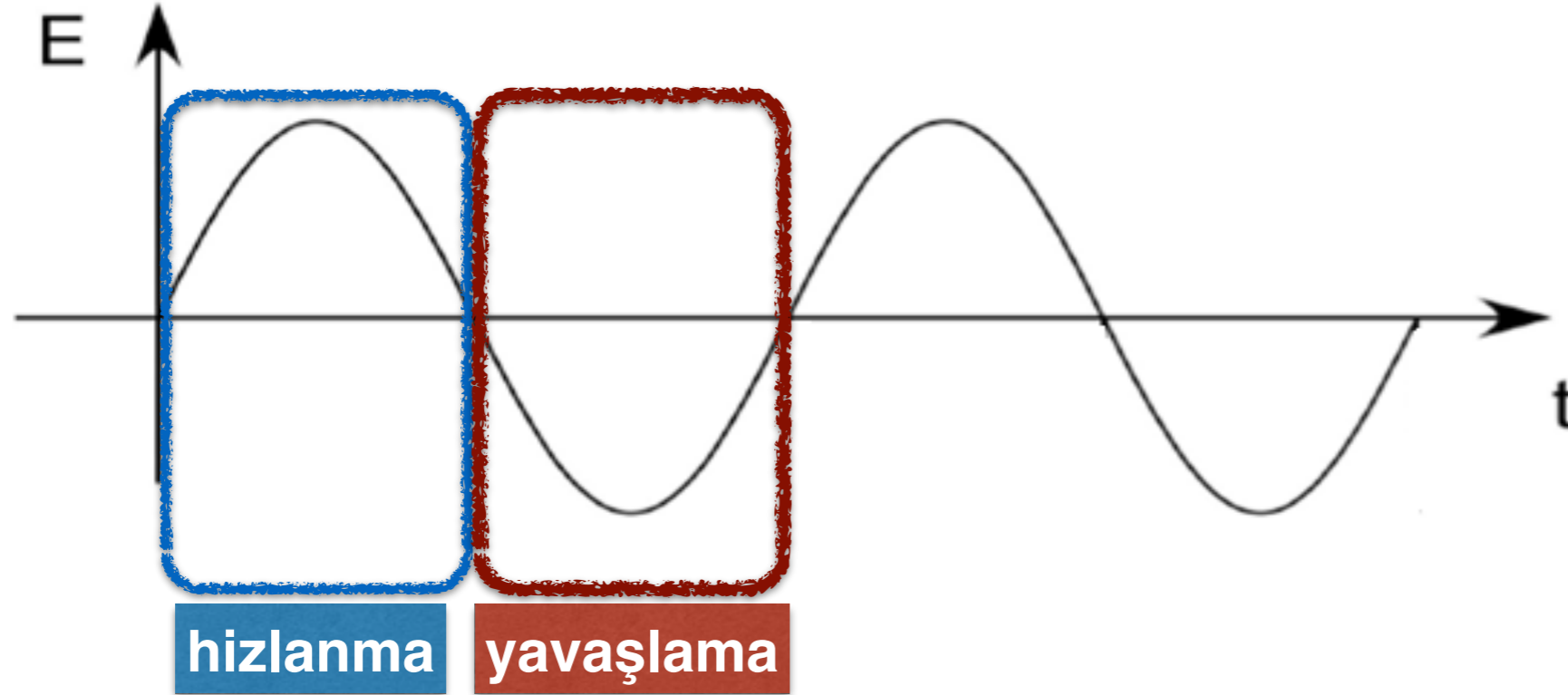
RF kovukları belirli bir frekansta çalışmak için tasarlanır. Frekans bant genişliği sınırlıdır. Bu sebeple eşzamanlayıcılar yüksek hızlarda kullanılır. Düşük hızlarda doğrusal hızlandırıcılar ile hücre boyu arttırılarak eşzamanlılığı sağlamak daha kolay.



# RF fazı ile boyuna odaklama

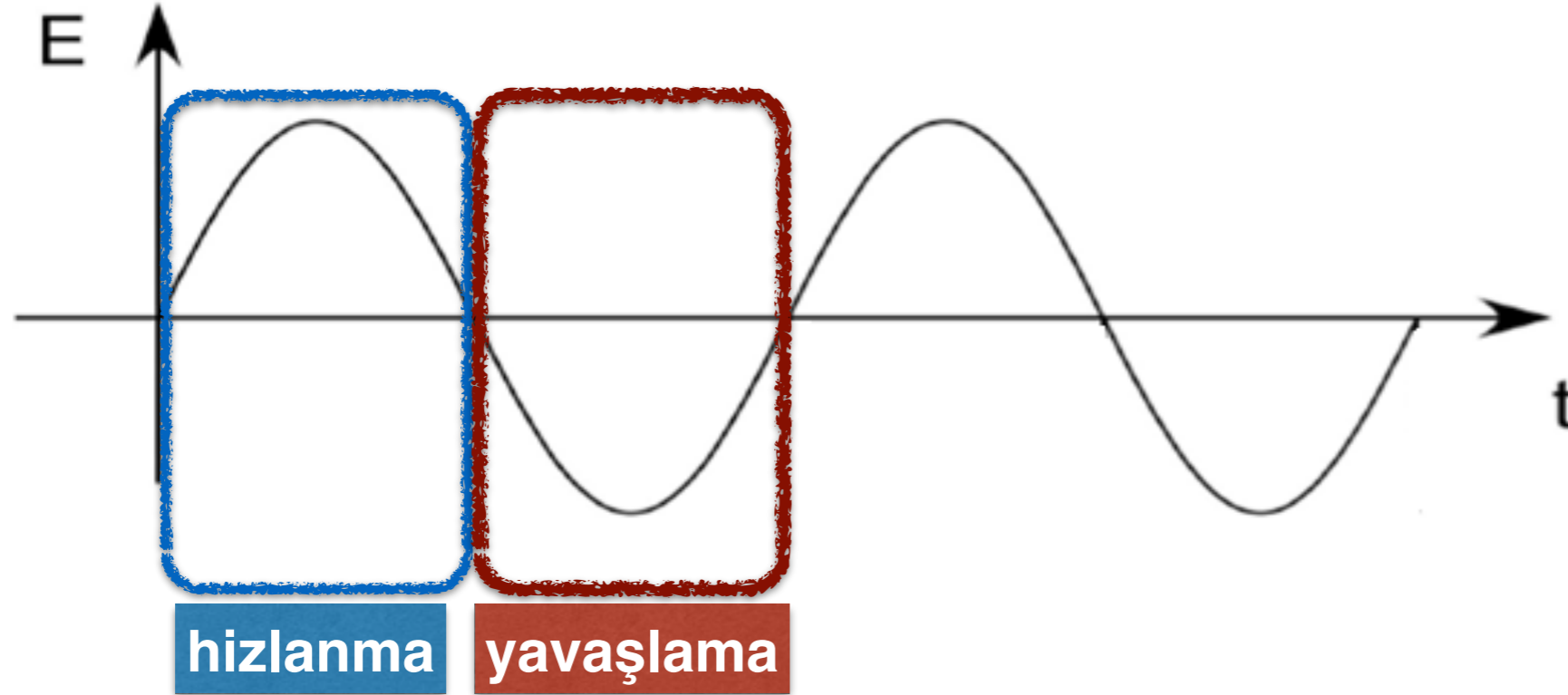
- Şimdiye kadar hep tek bir parçacık için eşzamanlılık koşulunu inceledik. Eşzamanlı parçacıkla kovuğa aynı anda gelmeyen parçacıklara ne oluyor?
- Önemli: Etkili bir hızlandırma için olabildiğince kısa bohçalara ihtiyacımız var.
- Dikey ekseninde 4-kutuplu mıknatıslarla (RFQ da elektrik alanla) odaklıyoruz.
- Boyuna ekseninde demetin bohçalı yapısını RF fazını uygun şekilde seçerek sağlıyoruz.

# RF ile neler yapabiliriz?



Soru: Hızlanma için parçacıkları tepenin hangi tarafına koysak?  
Yoksa tepeye mi koysak?

# RF ile neler yapabiliriz?

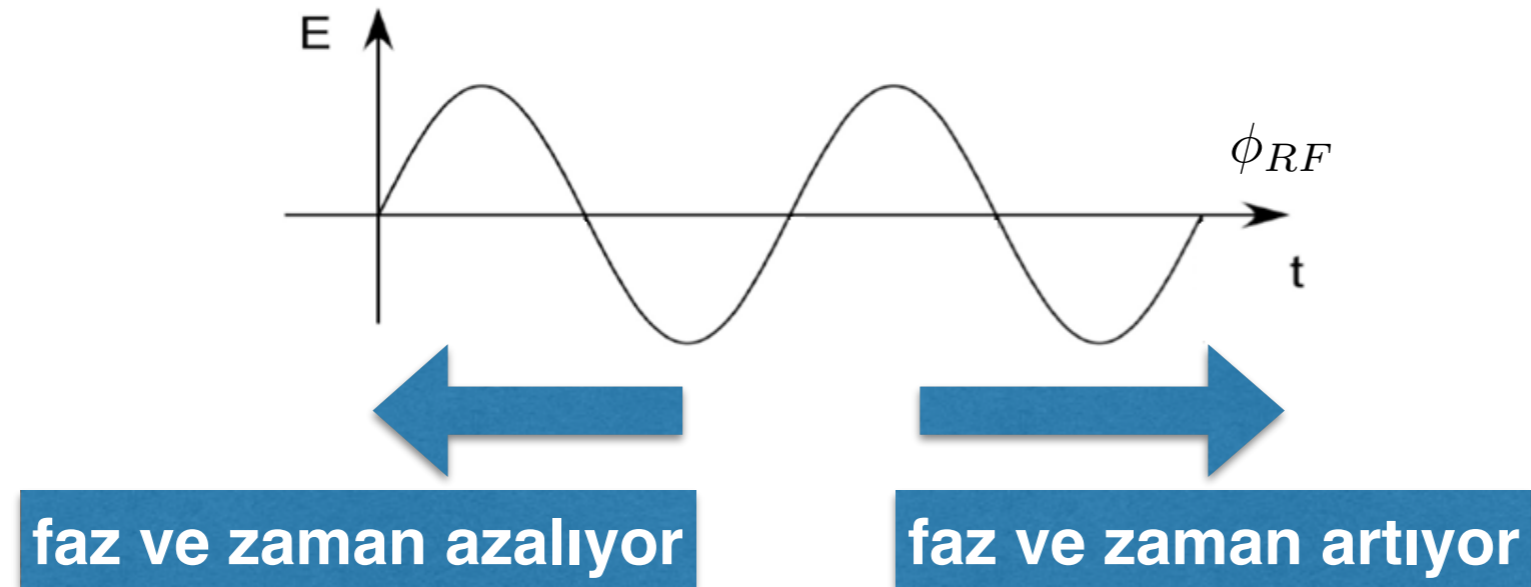


Soru: Hızlanma için parçacıkları tepenin hangi tarafına koysak?  
Yoksa tepeye mi koysak?

**Bu sorunun cevabı hızlandırıcının tipine (dairesel veya doğrusal) ve parçacıkların hızına göre değişir.**

**Amacımız: Olabildiğince çok hızlandırırken bohça yapısını korumak!!!**

# RF fazı ile boyuna odaklama



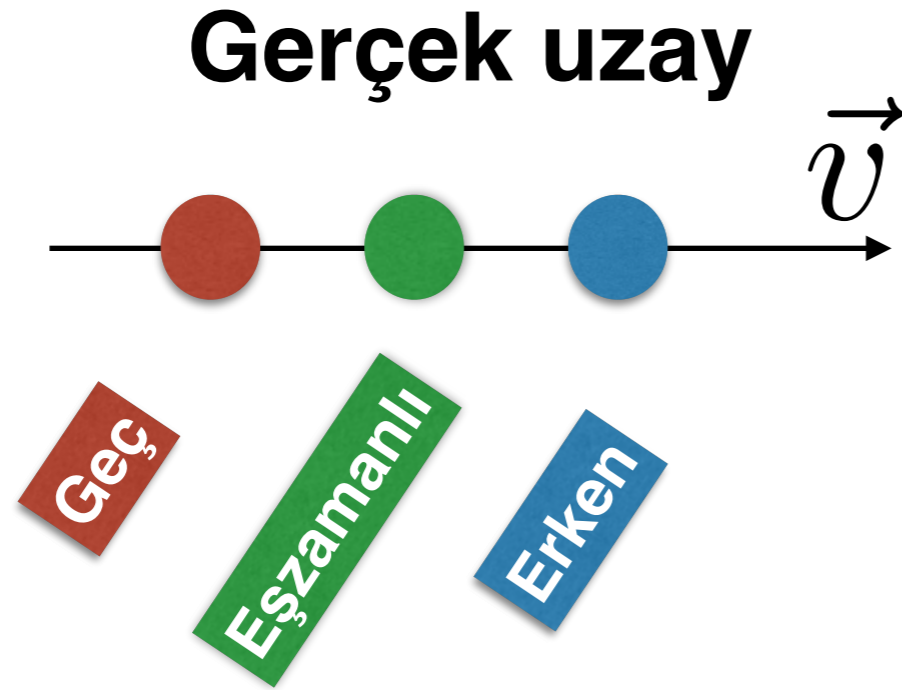
$$E(t) = E_{max} \sin(\phi)$$

$$\phi = \omega t$$

$$\omega = 2\pi f$$

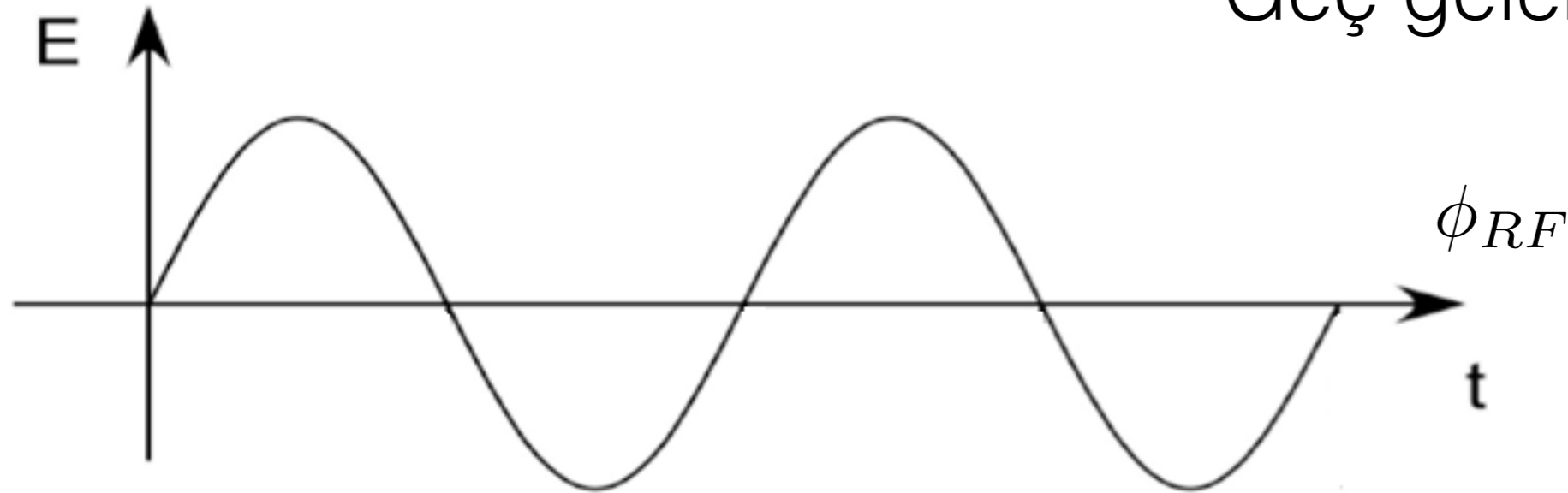


RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı) Hızlanma yok!!!



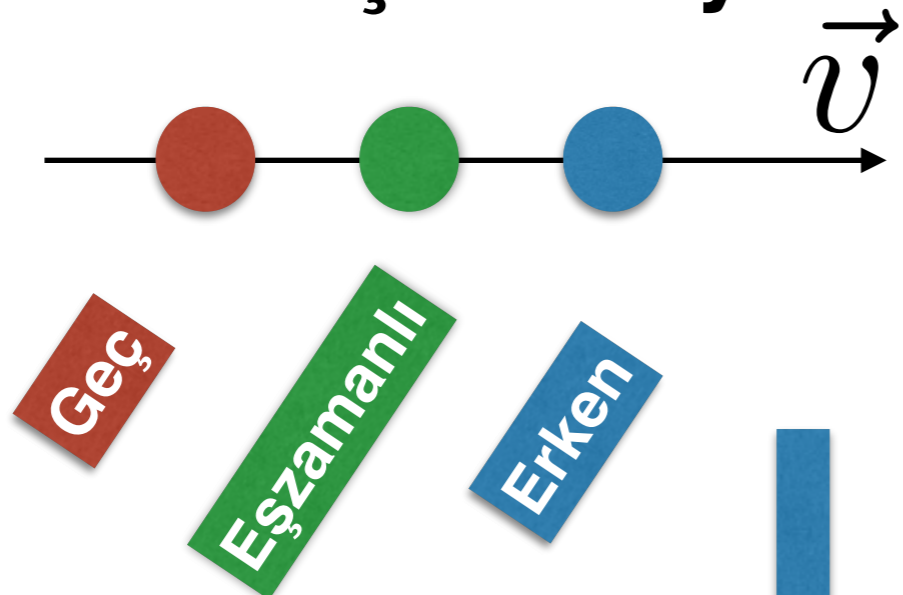
Erken ve geç parçacık eşzamanlı parçacığın hissettiği elektrik alanı hissetmez!!!

Erken geleni yavaşlat  
Eşzamanlıyı ivmelendirme  
Geç geleni hızlandır



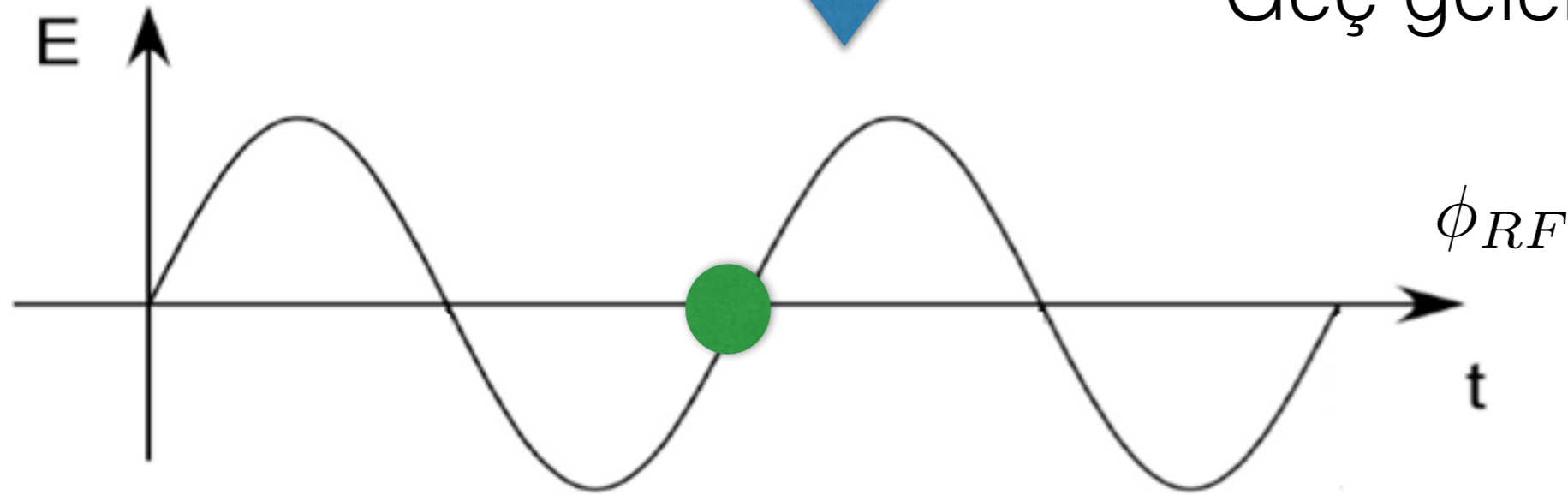
RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı) Hızlanma yok!!!

## Gerçek uzay



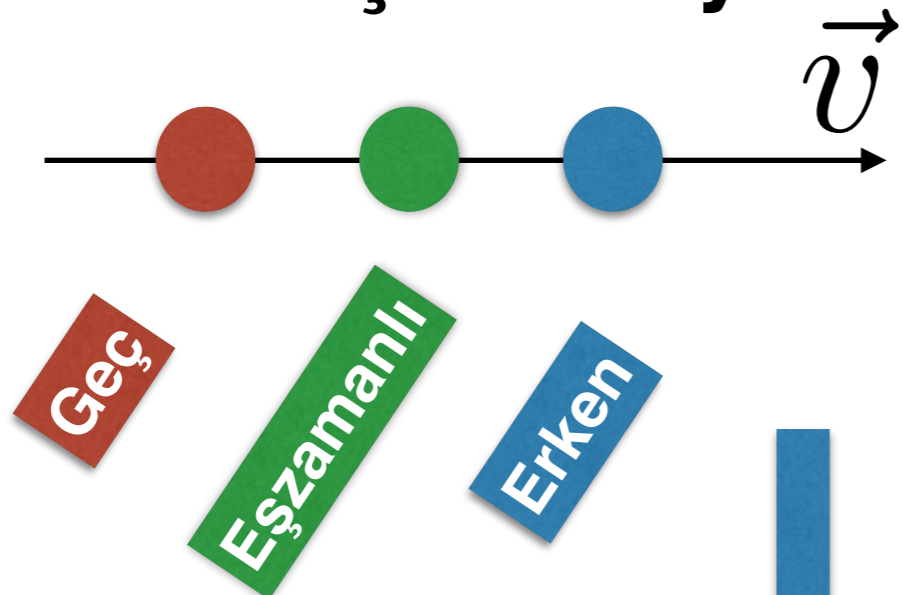
Erken ve geç parçacık eşzamanlı parçacığın hissettiği elektrik alanı hissetmez!!!

Erken geleni yavaşlat  
Eşzamanlıyı ivmelendirme  
Geç geleni hızlandır



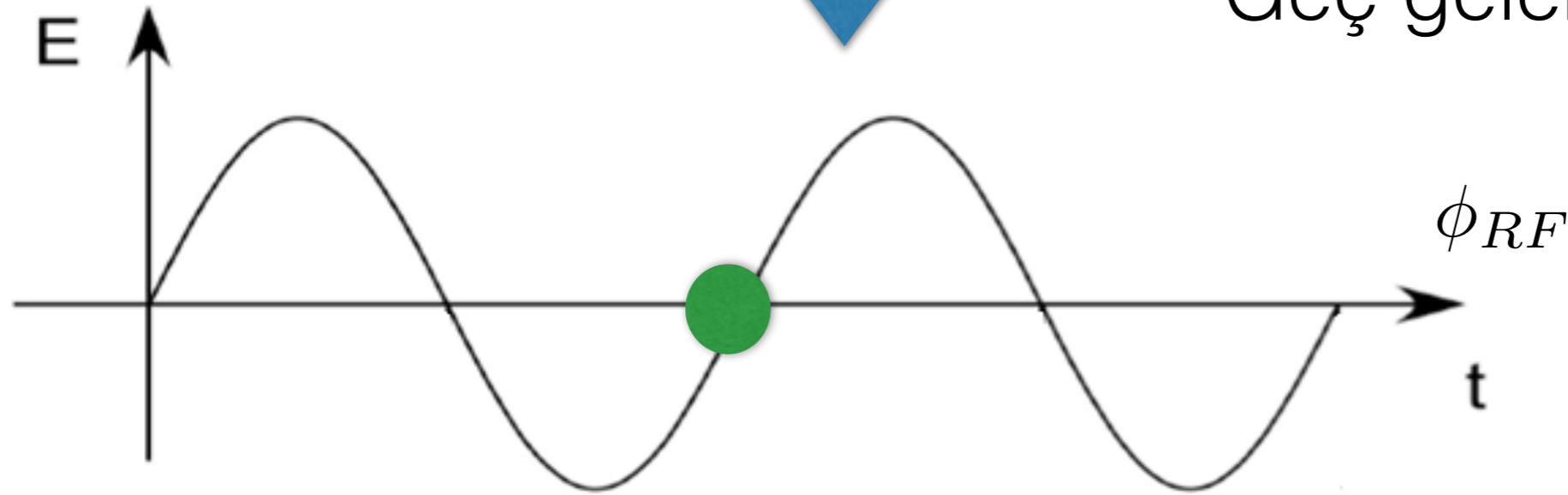
RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı) Hızlanma yok!!!

## Gerçek uzay



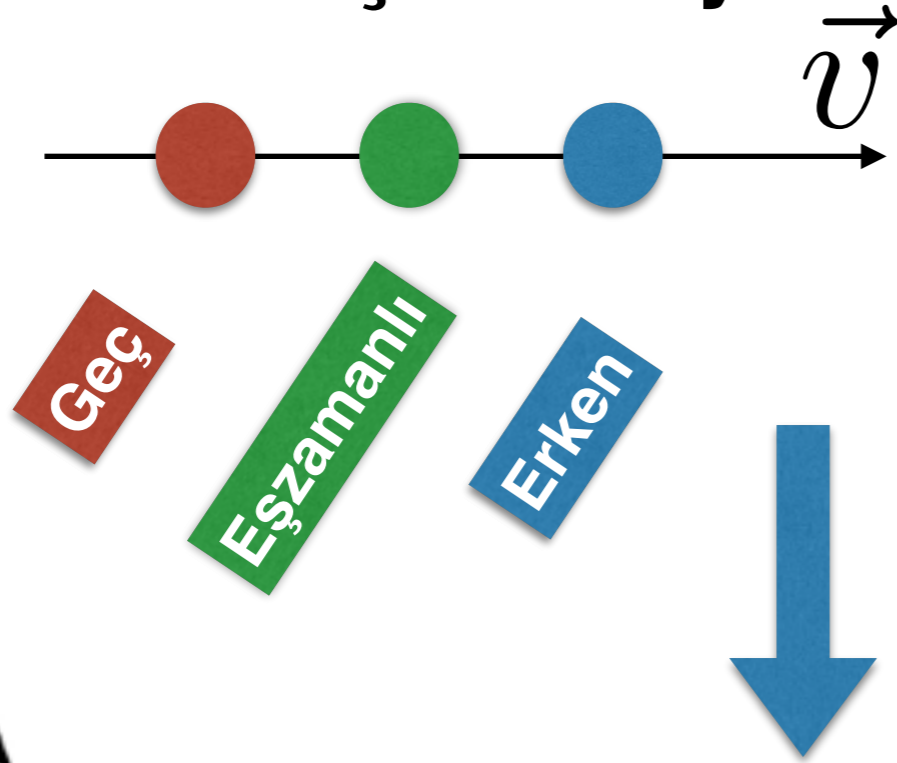
Erken ve geç parçacık eşzamanlı parçacığın hissettiği elektrik alanı hissetmez!!!

Erken geleni yavaşlat  
Eşzamanlıyı ivmelendirme  
Geç geleni hızlandır



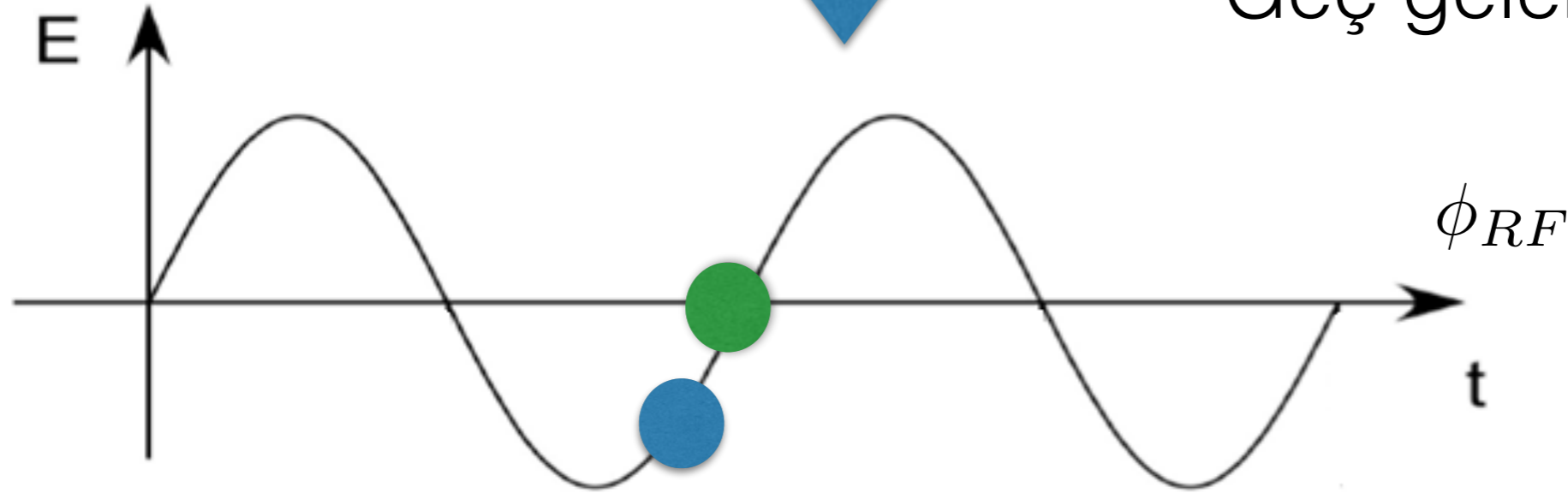
RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı) Hızlanma yok!!!

## Gerçek uzay



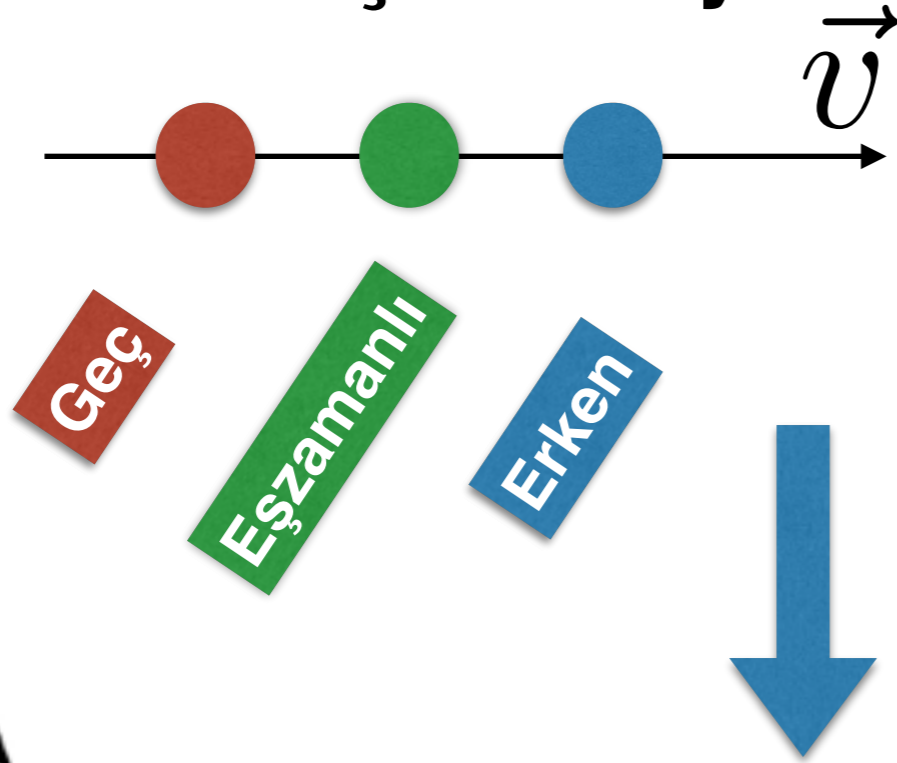
Erken ve geç parçacık eşzamanlı parçacığın hissettiği elektrik alanı hissetmez!!!

Erken geleni yavaşlat  
Eşzamanlıyı ivmelendirme  
Geç geleni hızlandır



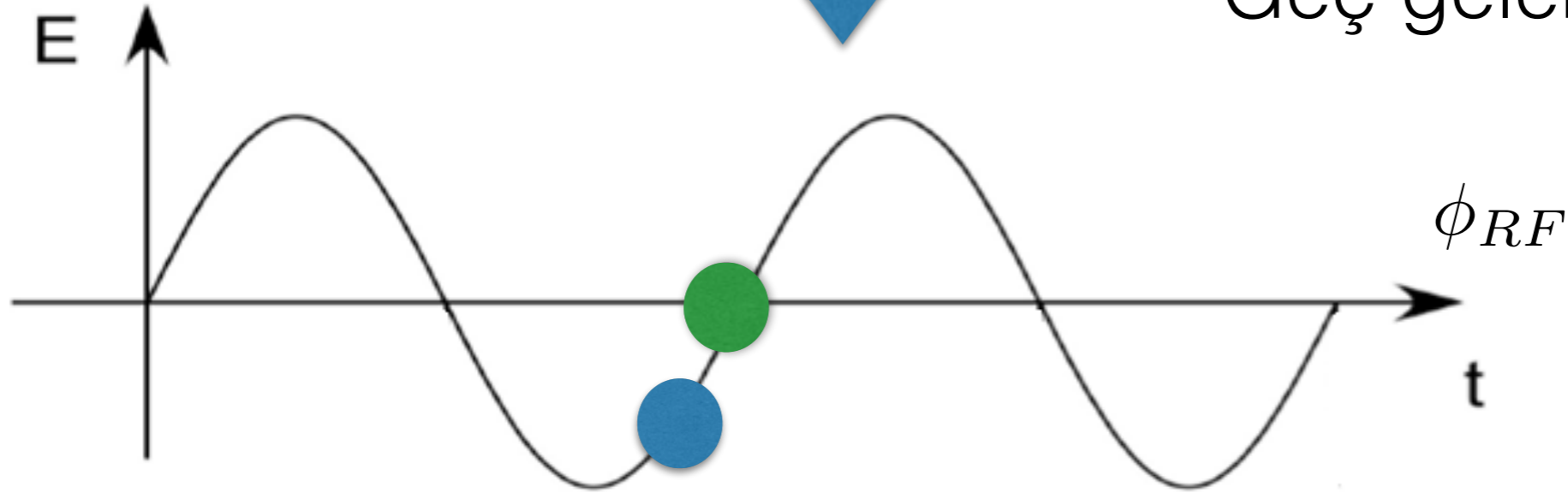
RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı) Hızlanma yok!!!

## Gerçek uzay



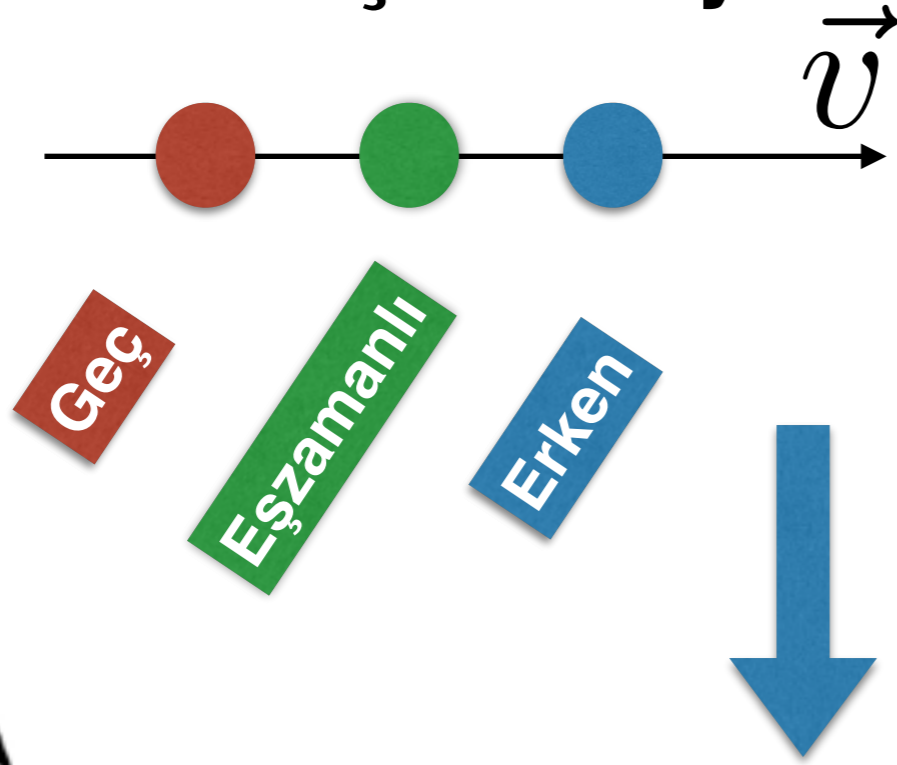
Erken ve geç parçacık eşzamanlı parçacığın hissettiği elektrik alanı hissetmez!!!

Erken geleni yavaşlat  
Eşzamanlıyı ivmelendirme  
Geç geleni hızlandır



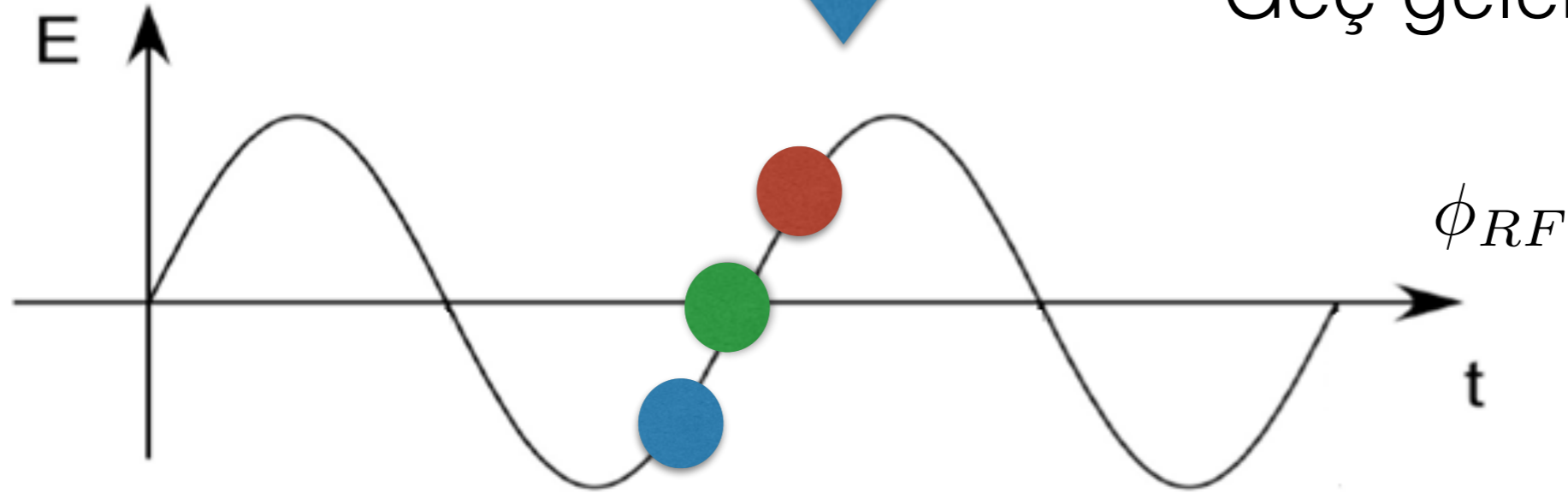
RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı) Hızlanma yok!!!

## Gerçek uzay

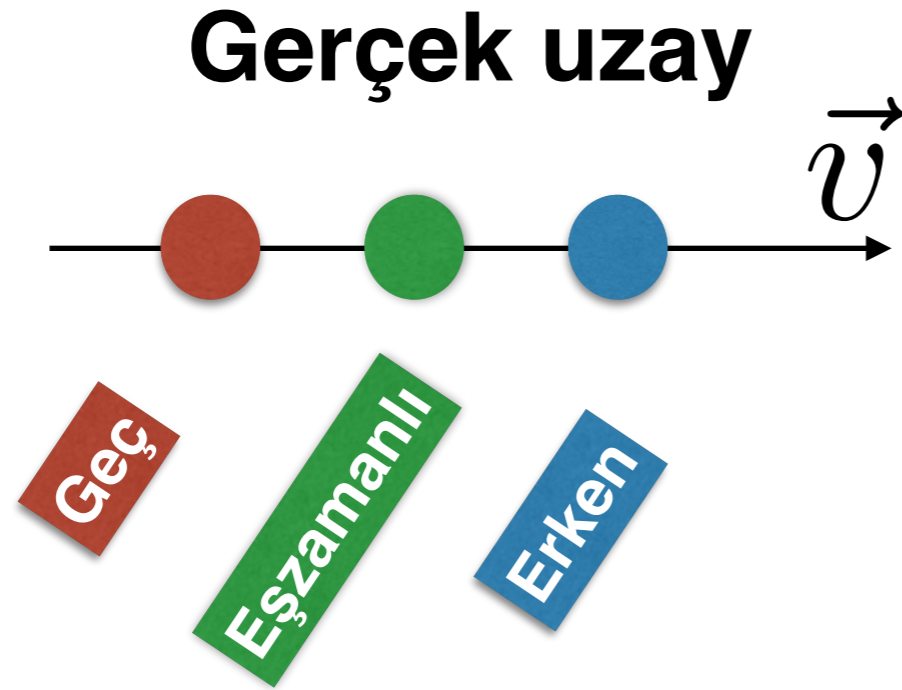


Erken ve geç parçacık eşzamanlı parçacığın hissettiği elektrik alanı hissetmez!!!

Erken geleni yavaşlat  
Eşzamanlıyı ivmelendirme  
Geç geleni hızlandır

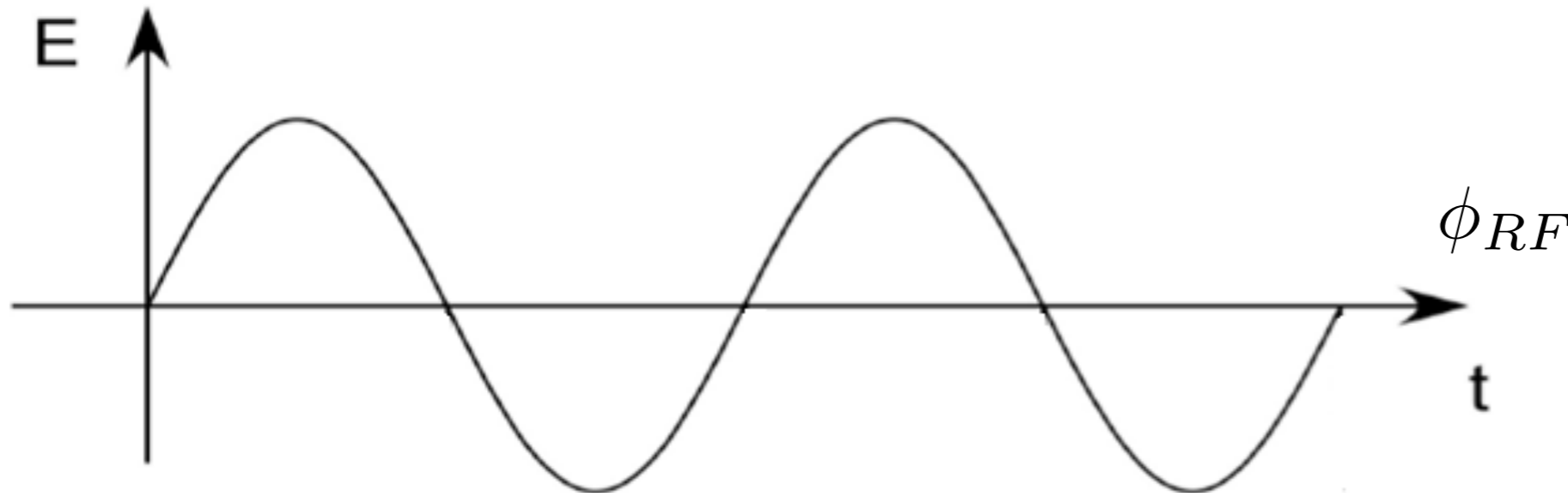


# Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı)

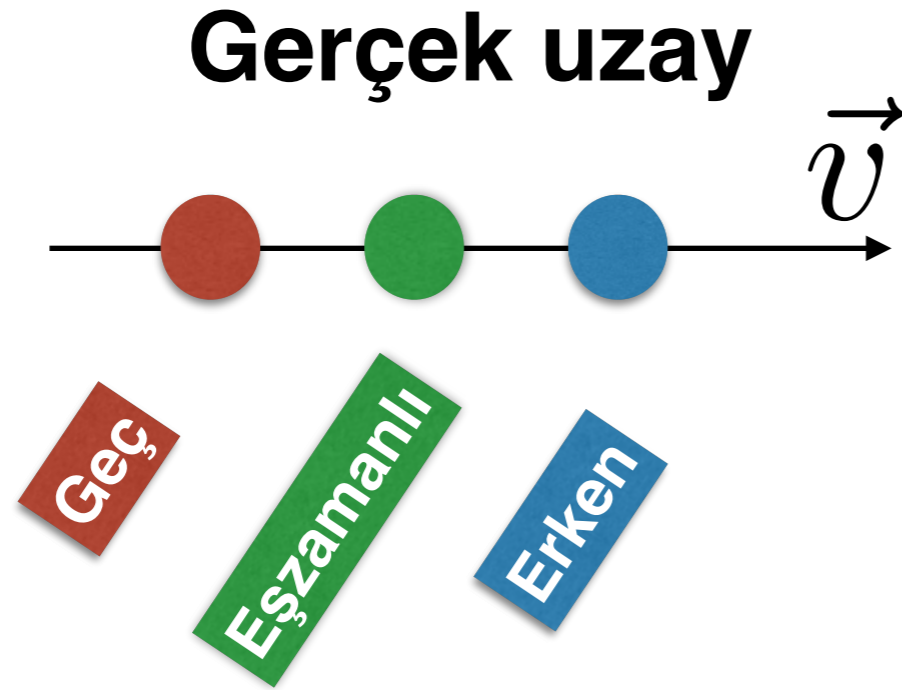


Eşzamanlı parçacık hızlandırma boşluğuna tam istediğimiz zamanda geliyor.

Hızlandırmak ve bohça yapısını korumak istiyoruz. Öndekini az, arkadakini çok hızlandıralım!!!

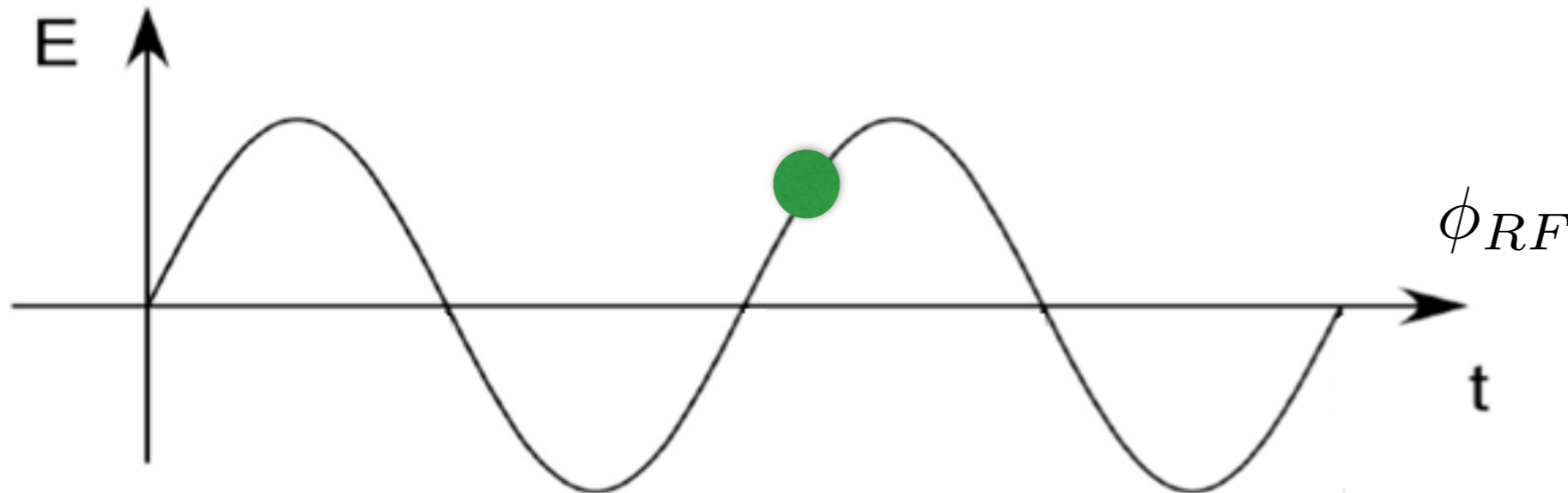


# Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı)



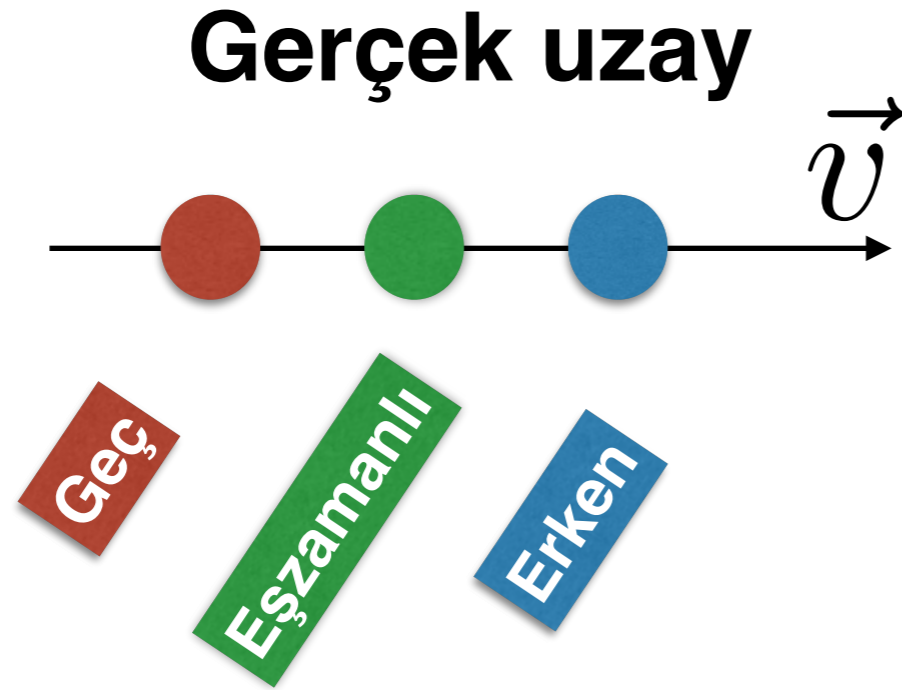
Eşzamanlı parçacık hızlandırma boşluğuna tam istediğimiz zamanda geliyor.

Hızlandırmak ve bohça yapısını korumak istiyoruz. Öndekini az, arkadakini çok hızlandıralım!!!



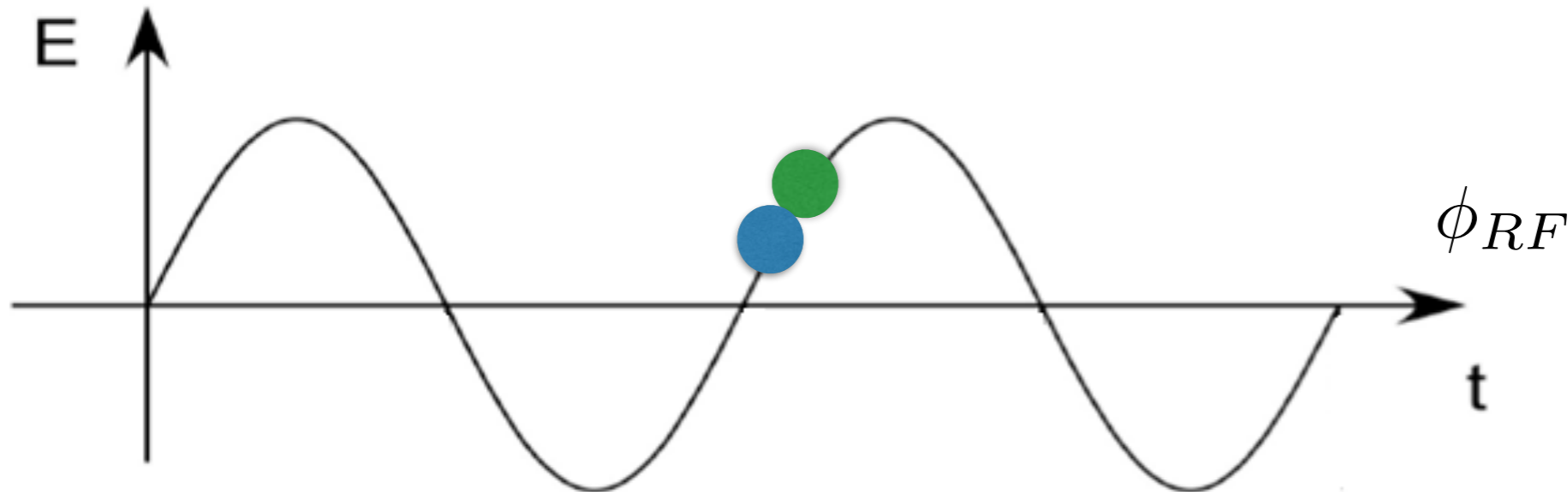


# Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı)

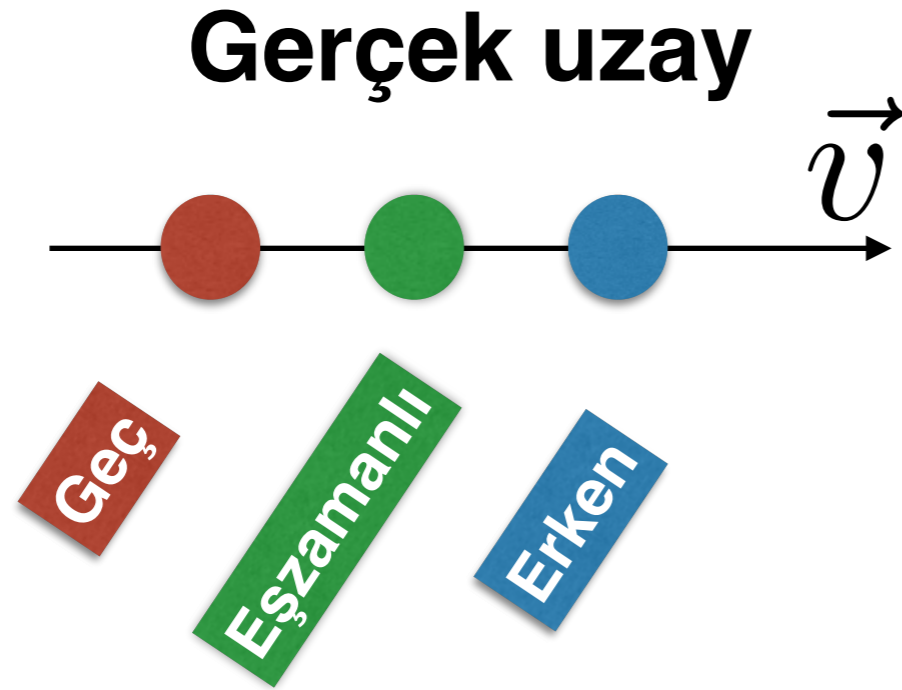


Eşzamanlı parçacık hızlandırma boşluğuna tam istediğimiz zamanda geliyor.

Hızlandırmak ve bohça yapısını korumak istiyoruz. Öndekini az, arkadakini çok hızlandıralım!!!

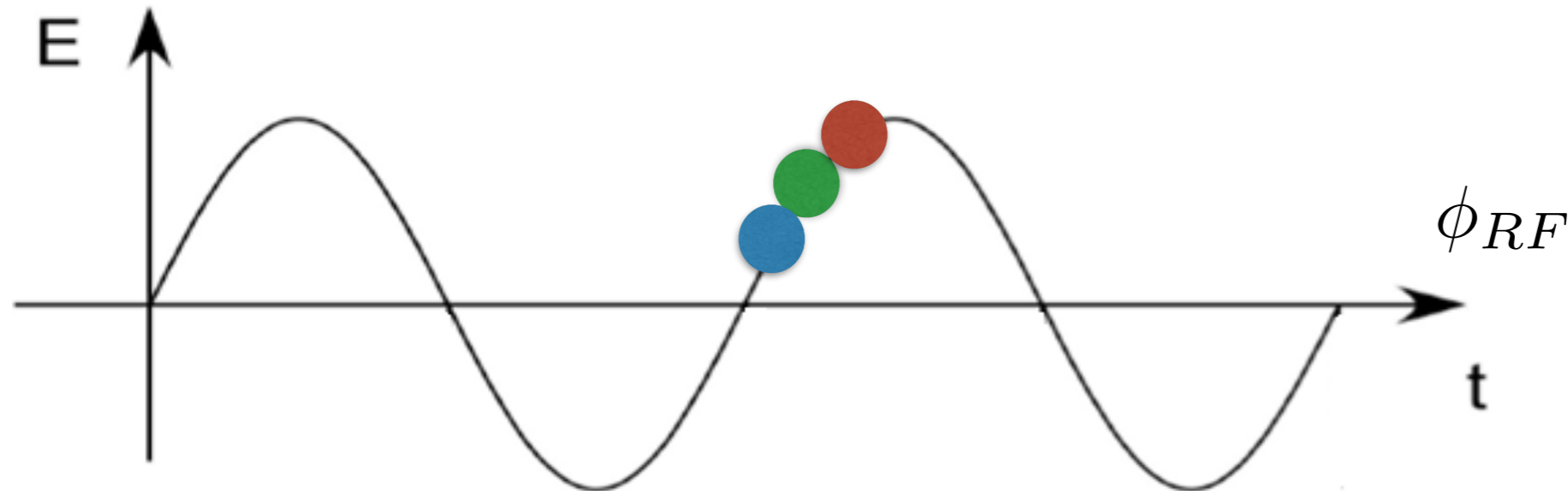


# Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı)

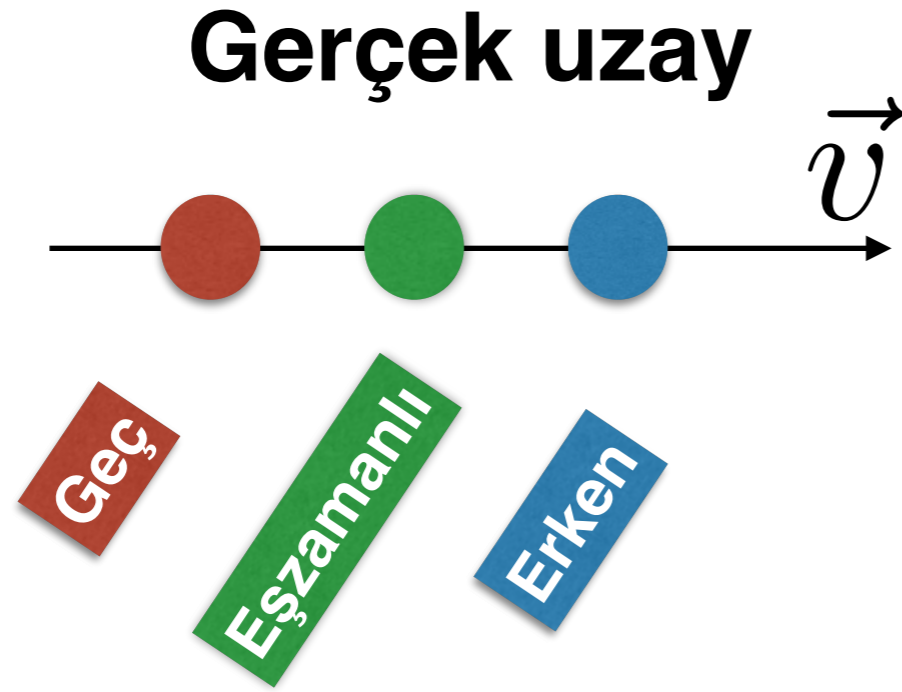


Eşzamanlı parçacık hızlandırma boşluğuna tam istediğimiz zamanda geliyor.

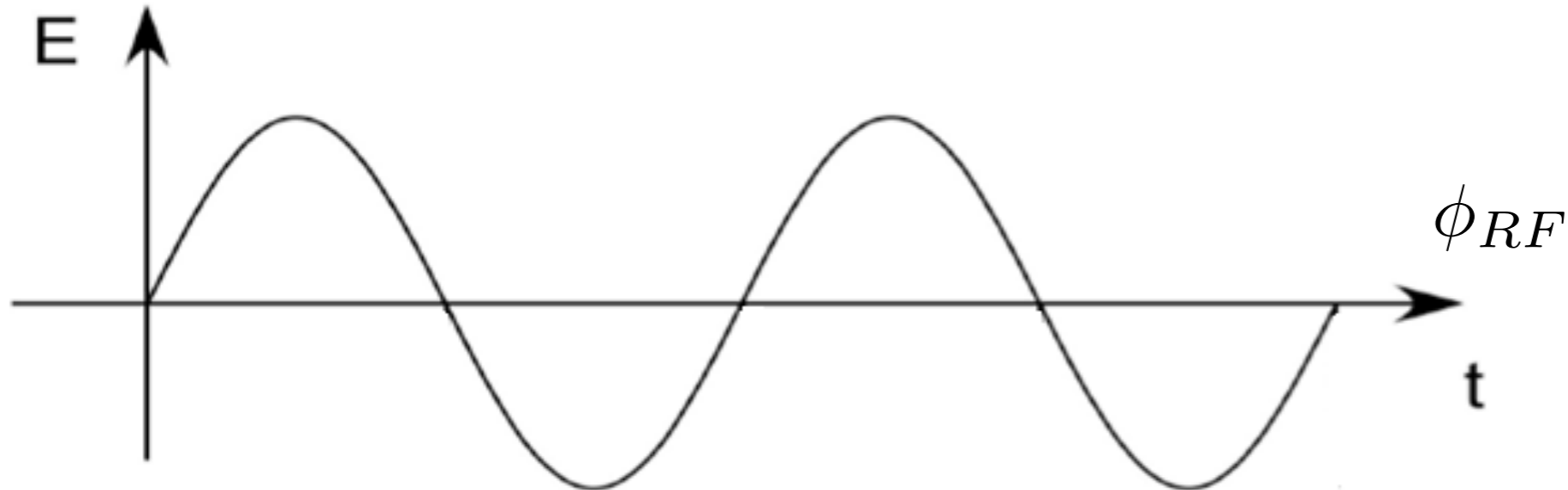
Hızlandırmak ve bohça yapısını korumak istiyoruz. Öndekini az, arkadakini çok hızlandıralım!!!



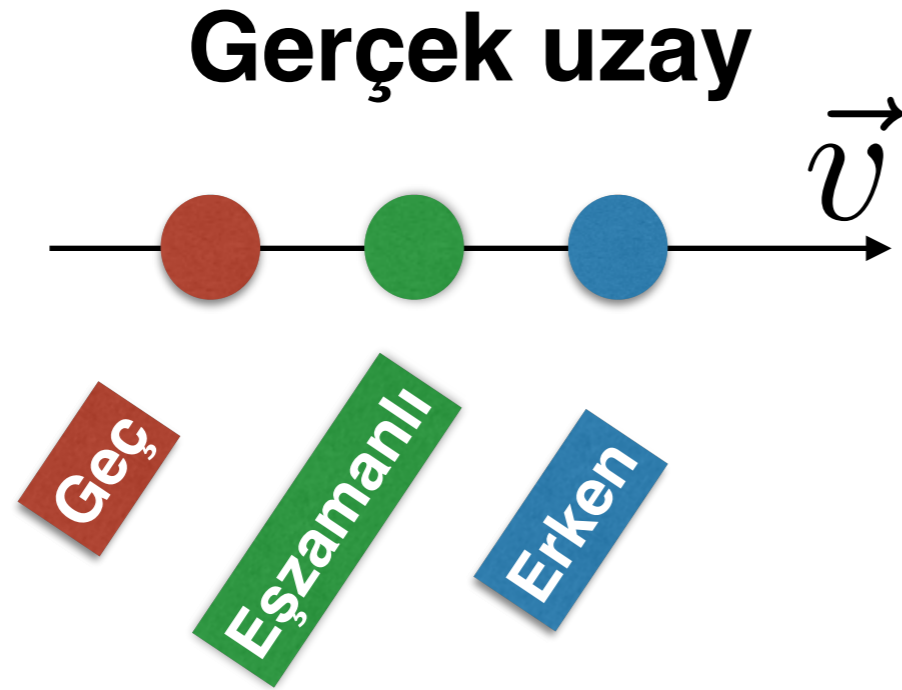
# Yavaşlarken RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı)



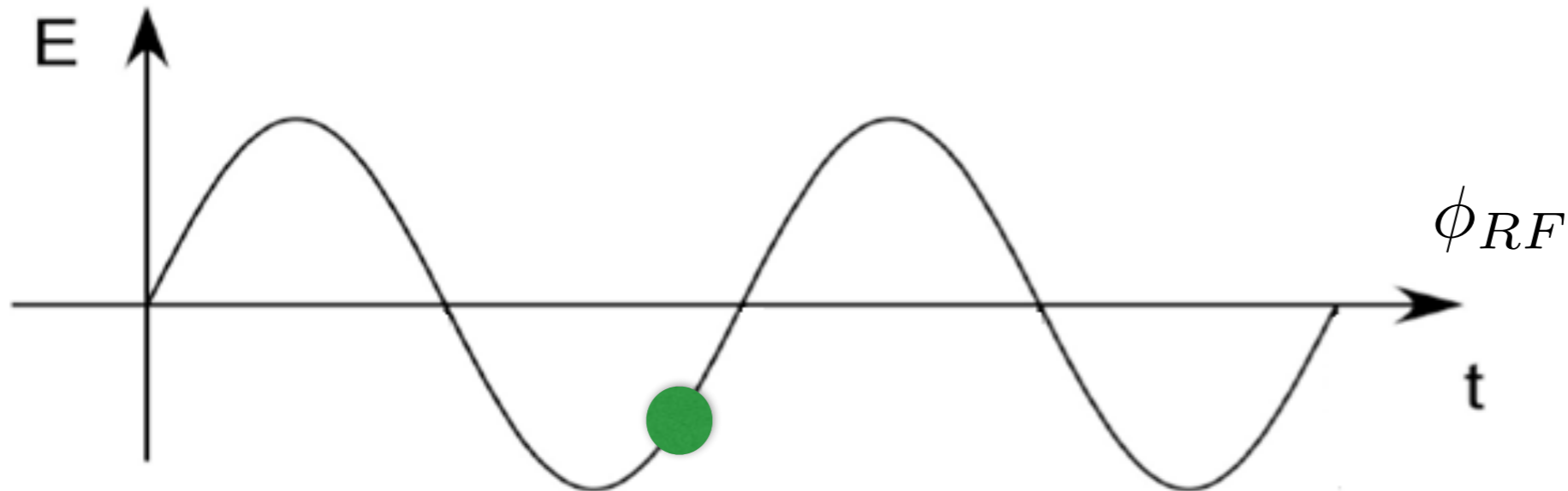
Öndekini çok yavaşlat  
Arkadakini az yavaşlat



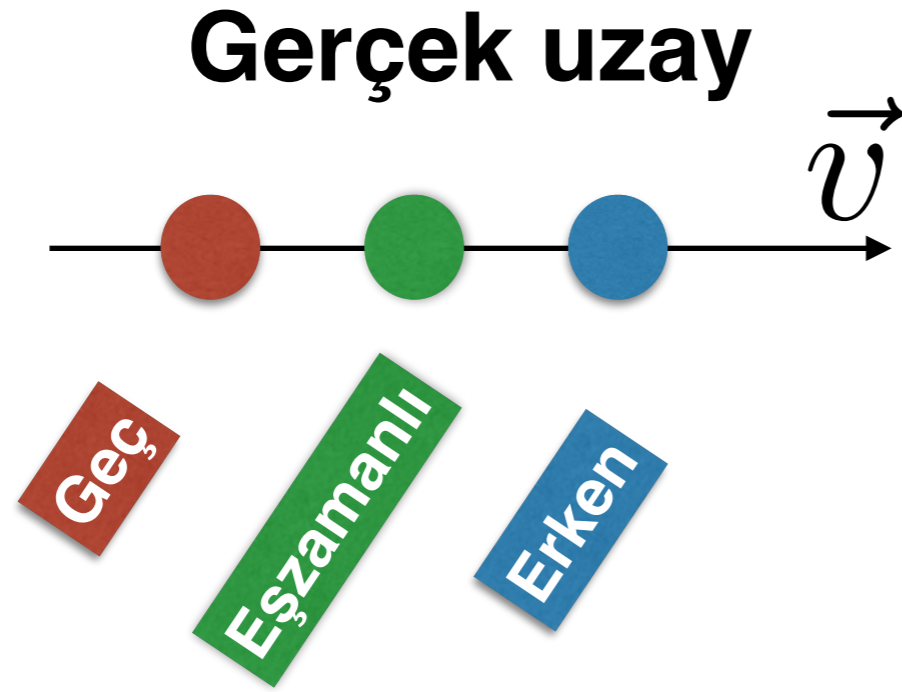
# Yavaşlarken RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı)



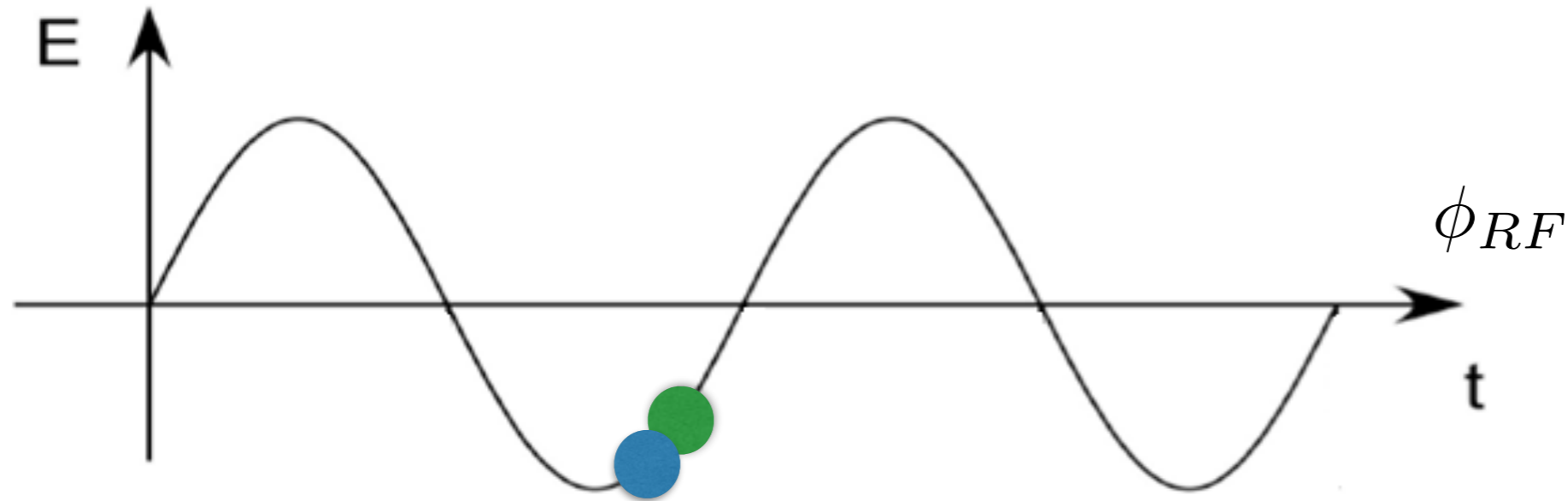
Öndekini çok yavaşlat  
Arkadakini az yavaşlat



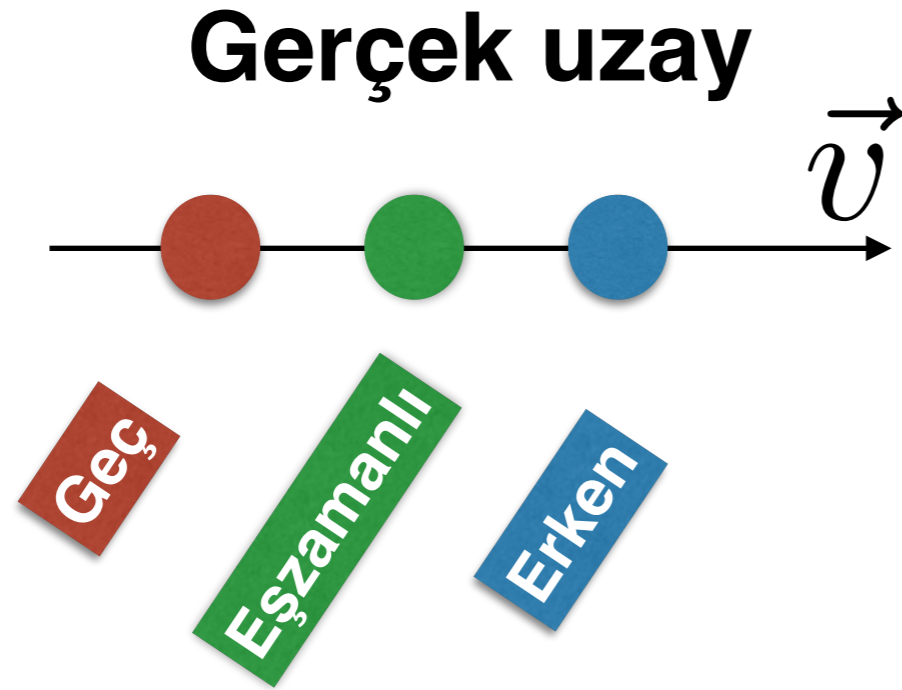
# Yavaşlarken RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı)



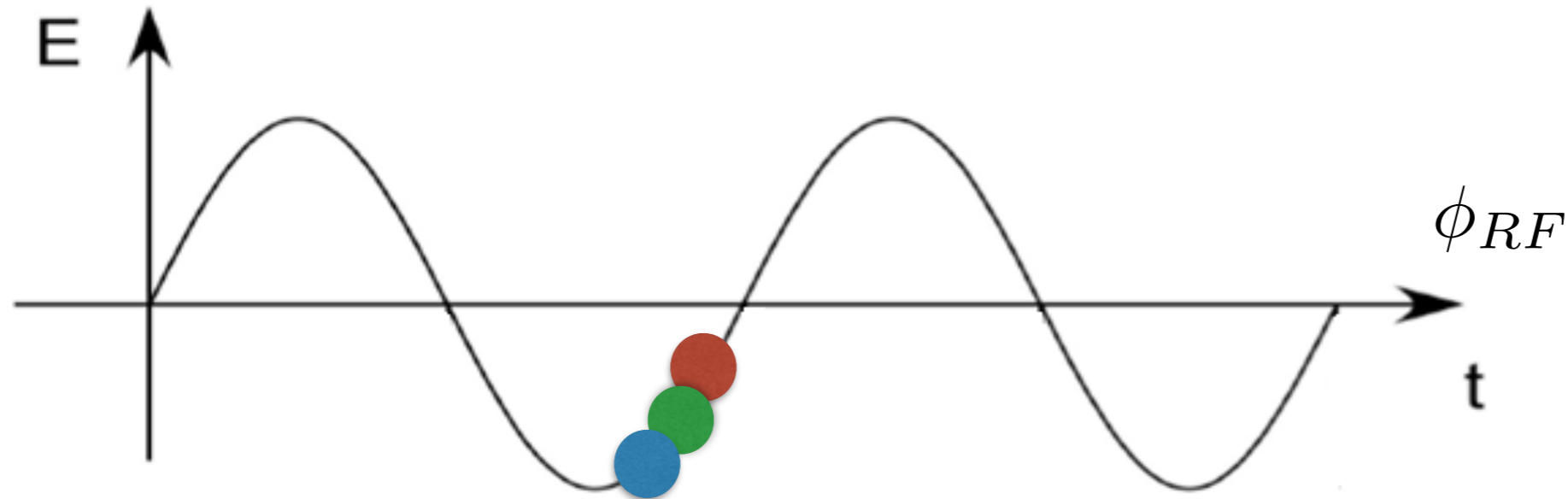
Öndekini çok yavaşlat  
Arkadakini az yavaşlat



Yavaşlarken RF fazı ile boyuna odaklama (doğrusal hızlandırıcı)

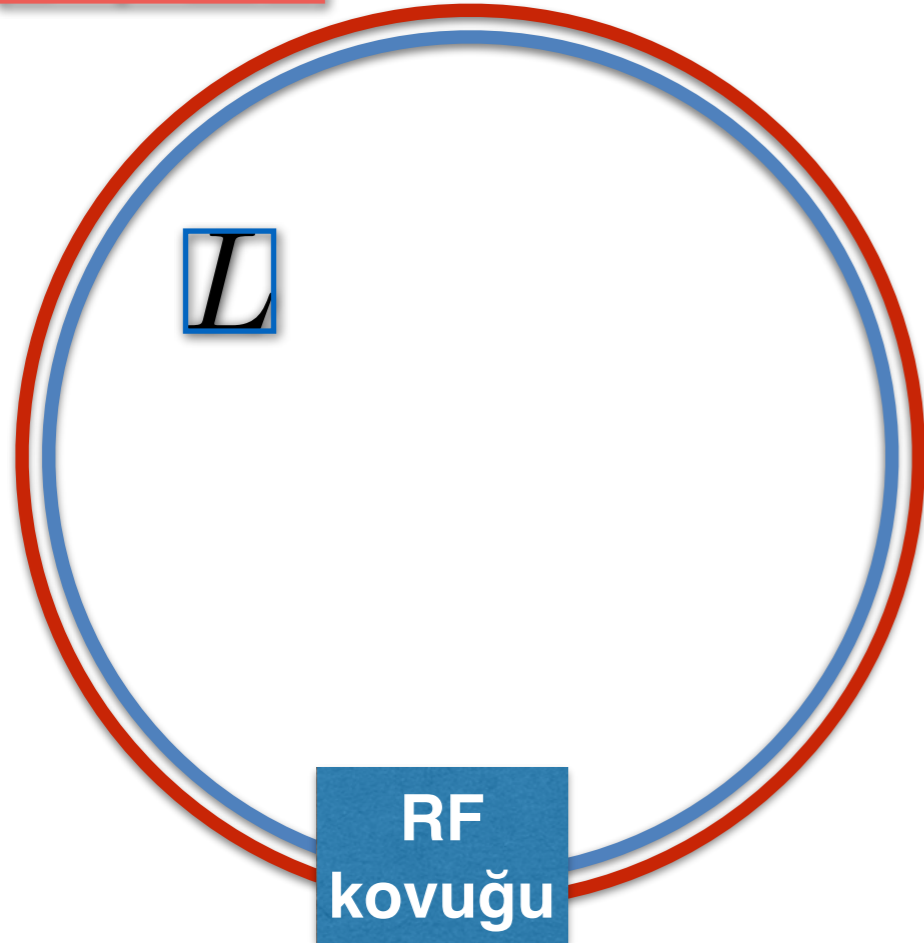


Öndekini çok yavaşlat  
Arkadakini az yavaşlat



# Eşzamanlayıcıda eşzamanlılık ve Momentum sıkıştırma katsayısı

$$L + \Delta L$$



Dairesel hızlandırıcılarda eşzamanlı parçacığın hızı arttıkça mıknatısların manyetik alanları artırılır ve eşzamanlı parçacık her zaman aynı uzunlukta bir yörüngede hareket eder.

Bohçadaki her parçacığın momentumu eşzamanlı parçacık ile aynı değil.  
Momentum farkından dolayı parçacıkların izlediği yörünge eşzamanlı parçacığın yörüngesinden farklıdır.

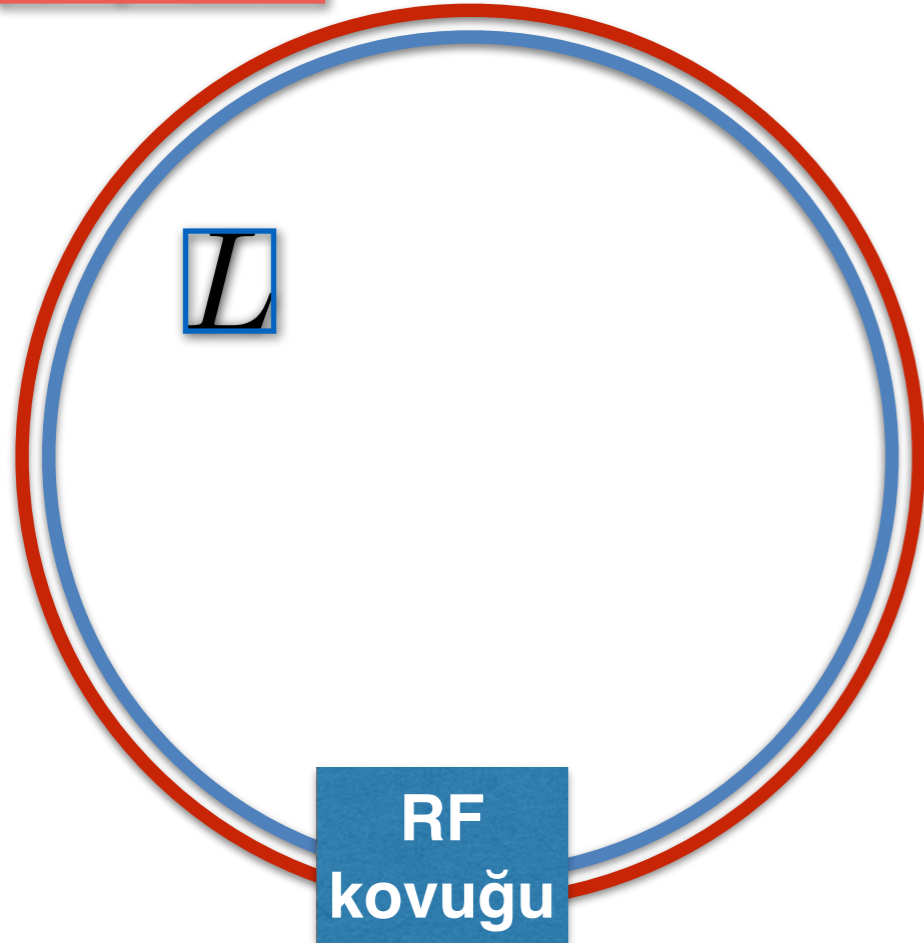
Enine dinamik II dersinden hatırlayalım!!!

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_{cp} \frac{\Delta p}{p}$$

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{L} \oint \frac{D(s)}{\rho(s)} ds$$

# Eşzamanlayıcıda eşzamanlılık ve Momentum sıkıştırma katsayısı

$$L + \Delta L$$



Dairesel hızlandırıcılarda eşzamanlı parçacığın hızı artıkça mıknatısların manyetik alanları artırılır ve eşzamanlı parçacık her zaman aynı uzunlukta bir yörüngede hareket eder.

Bohçadaki her parçacığın momentumu eşzamanlı parçacık ile aynı değil. Momentum farkından dolayı parçacıkların izlediği yörünge eşzamanlı parçacığın yörüngesinden farklıdır.

$$\Delta p$$

Herhangibir parçacık ile eşzamanlı parçacık arasındaki momentum farkı

Enine dinamik II dersinden hatırlayalım!!!

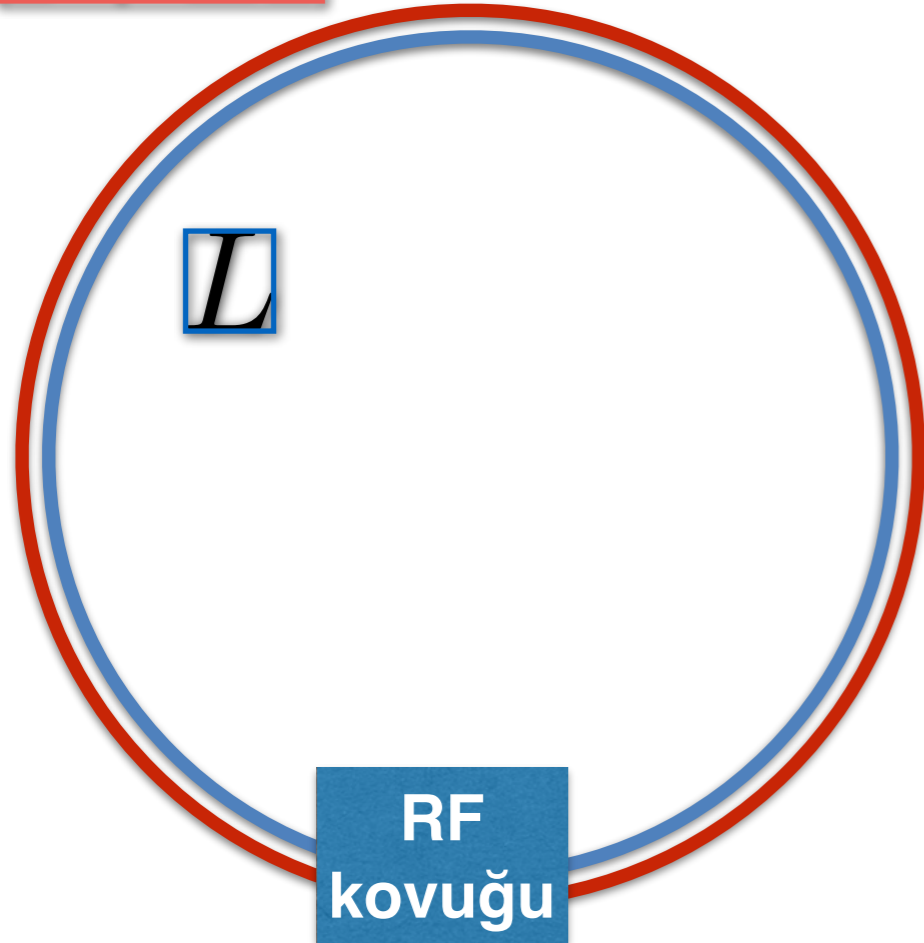
$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_{cp} \frac{\Delta p}{p}$$

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{L} \oint \frac{D(s)}{\rho(s)} ds$$



# Eşzamanlayıcıda eşzamanlılık ve Momentum sıkıştırma katsayısı

$$L + \Delta L$$



Dairesel hızlandırıcılarda eşzamanlı parçacığın hızı artıkça mıknatısların manyetik alanları artırılır ve eşzamanlı parçacık her zaman aynı uzunlukta bir yörüngede hareket eder.

Bohçadaki her parçacığın momentumu eşzamanlı parçacık ile aynı değil. Momentum farkından dolayı parçacıkların izlediği yörünge eşzamanlı parçacığın yörüngesinden farklıdır.

$$\Delta p$$

Herhangibir parçacık ile eşzamanlı parçacık arasındaki momentum farkı

$$\Delta L$$

Momentum farkından kaynaklanan yörünge uzunluğu farkı

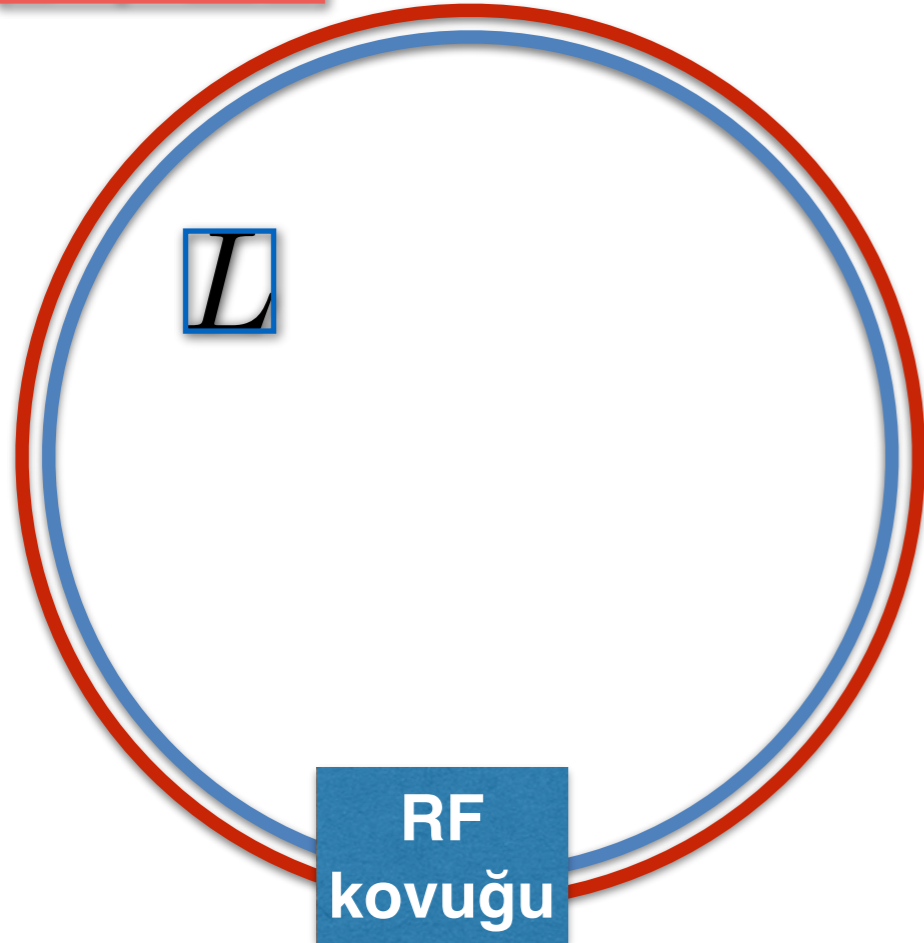
Enine dinamik II dersinden hatırlayalım!!!

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_{cp} \frac{\Delta p}{p}$$

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{L} \oint \frac{D(s)}{\rho(s)} ds$$

# Eşzamanlayıcıda eşzamanlılık ve Momentum sıkıştırma katsayısı

$$L + \Delta L$$



Dairesel hızlandırıcılarda eşzamanlı parçacığın hızı arttıkça mıknatısların manyetik alanları artırılır ve eşzamanlı parçacık her zaman aynı uzunlukta bir yörüngede hareket eder.

Bohçadaki her parçacığın momentumu eşzamanlı parçacık ile aynı değil. Momentum farkından dolayı parçacıkların izlediği yörünge eşzamanlı parçacığın yörüngesinden farklıdır.

$$\Delta p$$

Herhangibir parçacık ile eşzamanlı parçacık arasındaki momentum farkı

$$\Delta L$$

Momentum farkından kaynaklanan yörünge uzunluğu farkı

Enine dinamik II dersinden hatırlayalım!!!

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_{cp} \frac{\Delta p}{p}$$

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{L} \oint \frac{D(s)}{\rho(s)} ds$$

# Geçiş Enerjisi (transition energy)

$$p + \Delta p \rightarrow L + \Delta L$$

$$p + \Delta p \rightarrow v + \Delta v$$

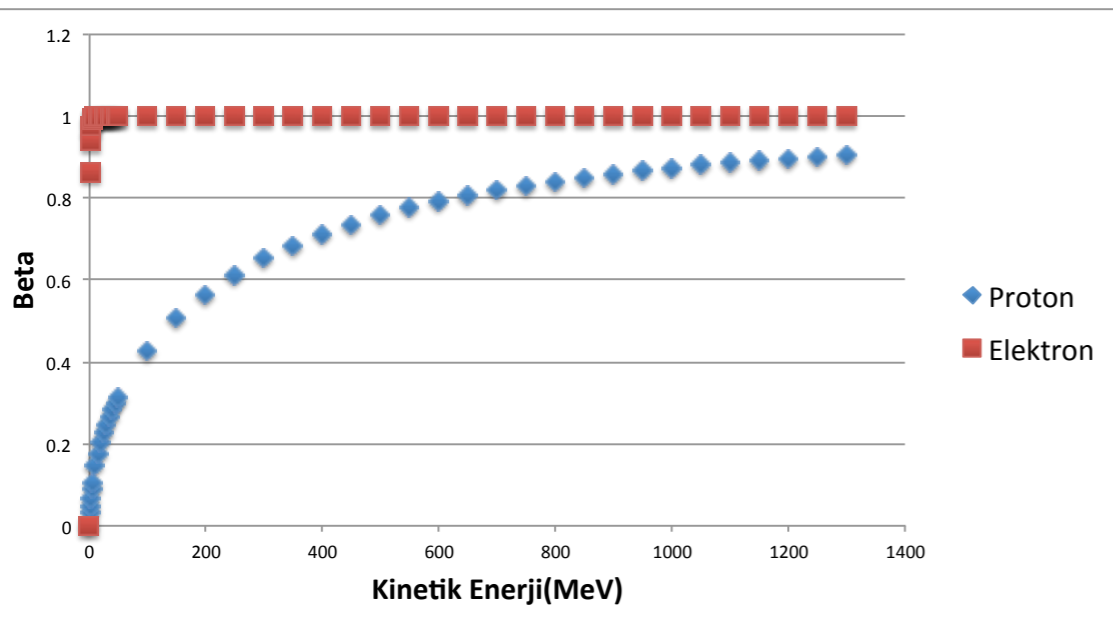
- Parçacıkların momentumları eşzamanlı parçacıktan farklı ise bir yörünge farkı var.
- Parçacıkların momentumları eşzamanlı parçacıktan farklı ise bir hız farkı var.
- Soru: Acaba dönme periyodu  $T_d = L/v$  nasıl etkileniyor?

# Geçiş Enerjisi (transition energy)

$$p + \Delta p \rightarrow L + \Delta L$$

$$p + \Delta p \rightarrow v + \Delta v$$

- Parçacıkların momentumları eşzamanlı parçacıktan farklı ise bir yörünge farkı var.
- Parçacıkların momentumları eşzamanlı parçacıktan farklı ise bir hız farkı var.
- Soru: Acaba dönme periyodu  $T_d = L/v$  nasıl etkileniyor?



Düşük enerjilerde hızın artma oranı  $L$  nin artma oranından daha yüksek. Momentumu büyük olan parçacık bir turu daha kısa zamanda tamamlıyor.

Yüksek enerjilerde hız neredeyse sabit.  $p$  arttıkça  $L$  artıyor fakat  $v$  artmıyor. Momentumu yüksek olan parçacık bir turu daha uzun zamanda tamamlıyor.

Geçiş enerjisi: Parçacığın momentum farkı olsa bile dönme periyodu eşzamanlı parçacık ile aynı. Bütün parçacıklar bir turu aynı zamanda tamamlıyor.

# Geçiş Enerjisi - hesap

Geçiş enerjisinden yüksek enerjilerde

Yüksek enerjili parçacıkların dönme periyodu düşük (dönme frekansı yüksek)

Geçiş enerjisinden düşük enerjilerde

Yüksek enerjili parçacıkların dönme periyodu yüksek (dönme frekansı düşük)

$$\eta = \frac{df/f}{dp/p}$$

momentum farkı ile dönme frekansı kayması arasındaki ilişki

$$f = \frac{v}{L} \rightarrow \frac{df}{f} = \frac{d\beta}{\beta} - \frac{dL}{L}$$

$$p = \frac{m_0 c \beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \rightarrow \frac{d\beta}{\beta} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{dp}{p}$$

$$\frac{dL}{L} = \alpha_{cp} \frac{dp}{p}$$

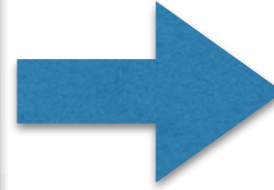
$$\frac{df}{f} = \left( \frac{1}{\gamma^2} - \alpha_{cp} \right) \frac{dp}{p}$$

$$\eta = \frac{1}{\gamma^2} - \alpha_{cp}$$

# Geçiş Enerjisi - hesap

Geçiş enerjisi için

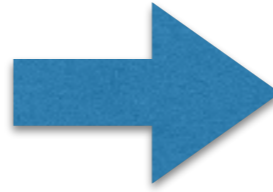
$$\eta = \frac{1}{\gamma^2} - \alpha_{cp} = 0$$



$$\gamma_{tr} = \sqrt{\frac{1}{\alpha_{cp}}}$$


hatırlayalım:

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{L} \oint \frac{D(s)}{\rho(s)} ds$$



Çevresi büyük olan eşzamanlayıcının geçiş enerjisi de büyük

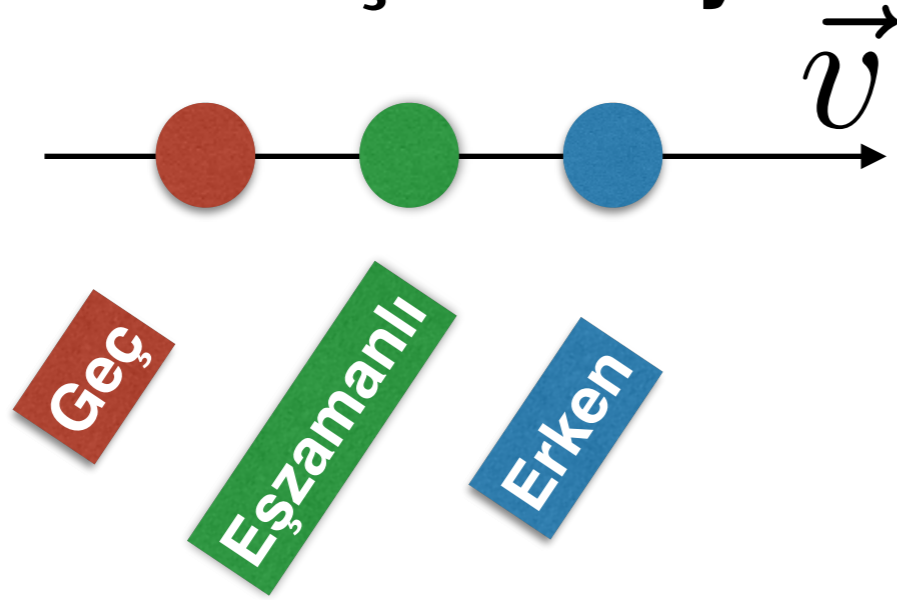
$\eta < 0$   Geçiş enerjisinin altında

$\eta > 0$   Geçiş enerjisinin üstünde

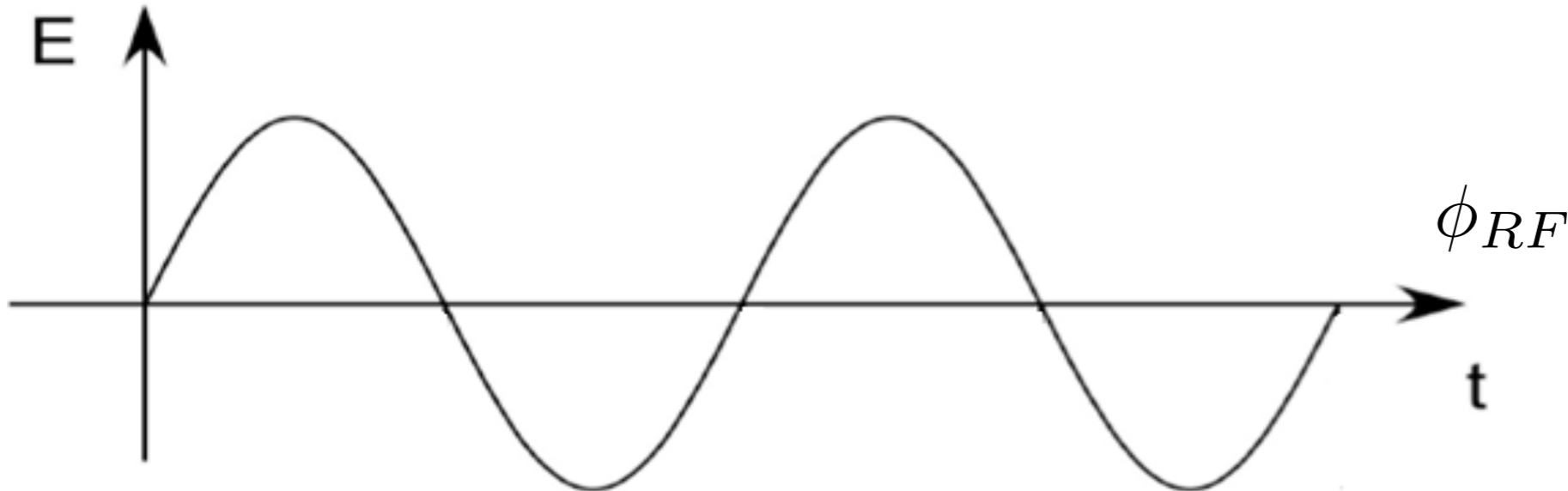
**Elektronların hızları çok çabuk arttığından, doğrusal hızlandırıcıdan eşzamanlıya verildiğinde demetin enerjisi geçiş enerjisinin üzerindedir!!!**

Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama  
(Eşzamanlayıcı, **E < geçiş enerjisi**)

**Gerçek uzay**

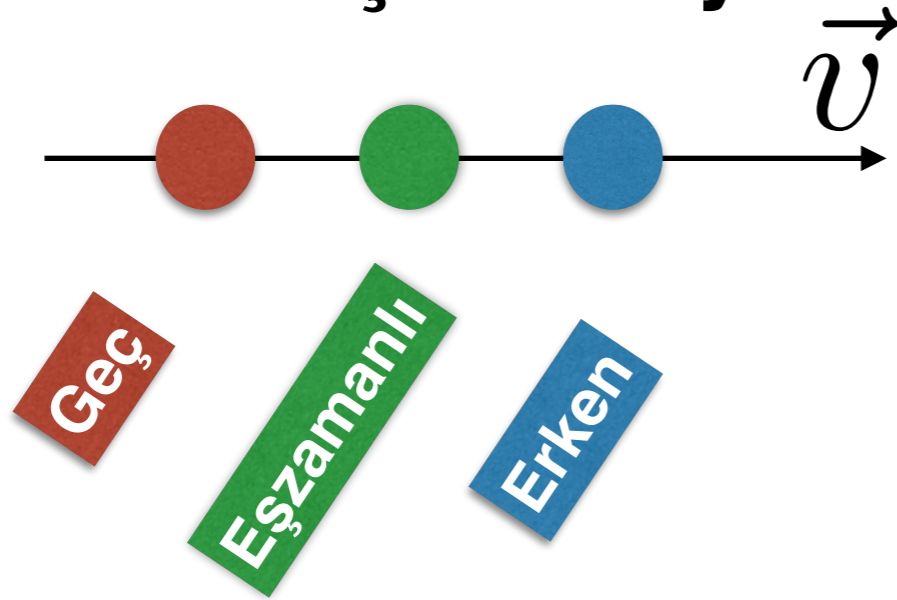


Soru: Eşzamanlı fazı tepenin solunu mu yoksa sağını mı seçelim?

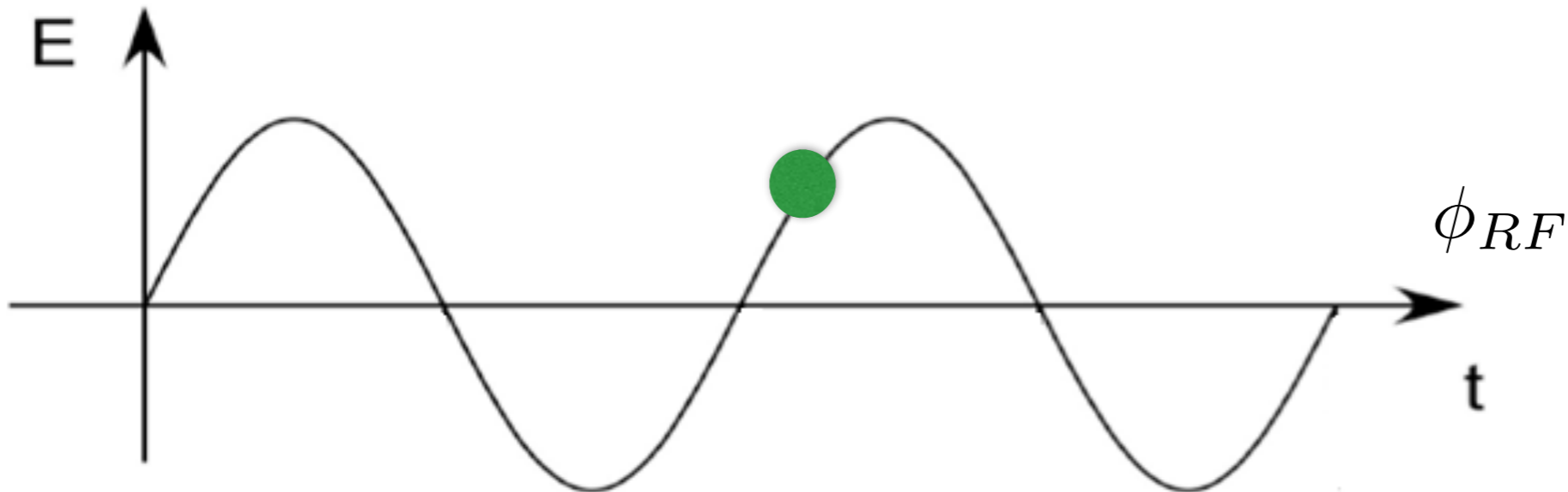


Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama  
(Eşzamanlayıcı, **E < geçiş enerjisi**)

**Gerçek uzay**

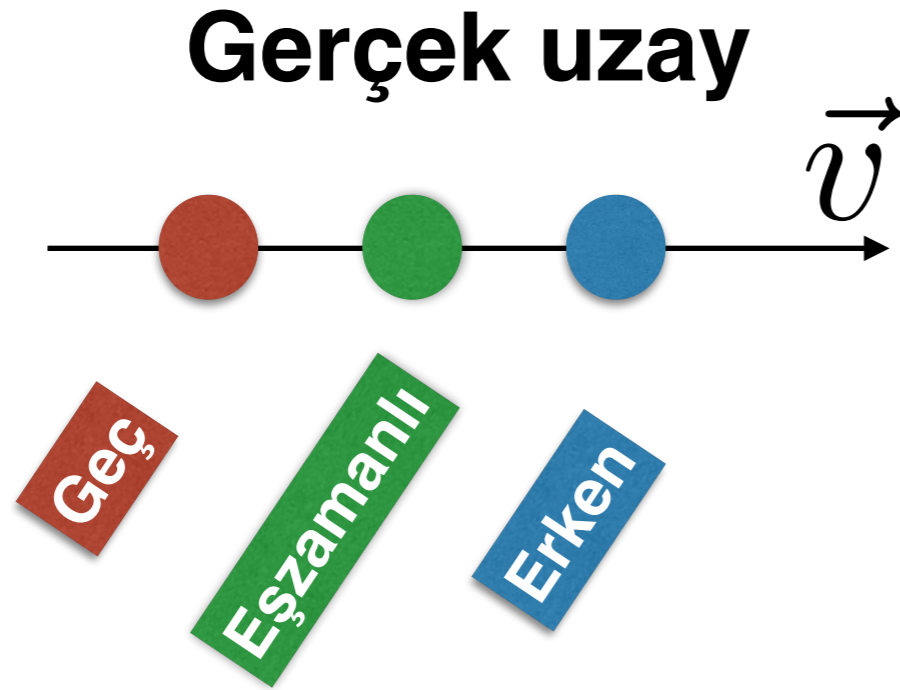


Soru: Eşzamanlı fazı tepenin solunu mu yoksa sağını mı seçelim?

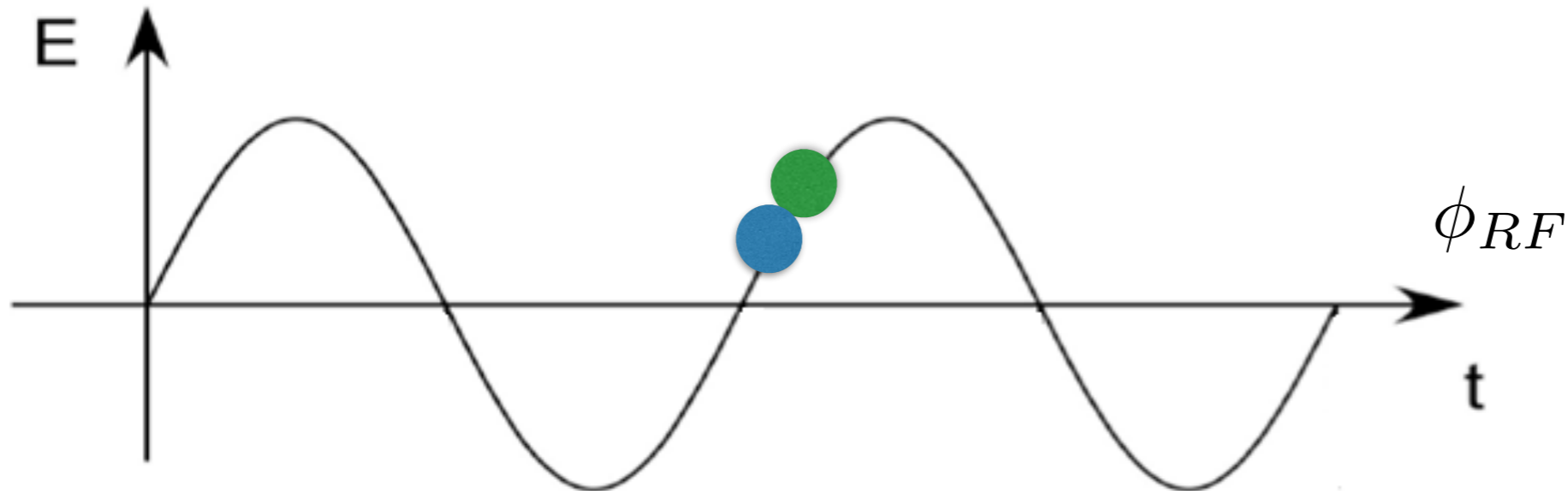




Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama  
(Eşzamanlayıcı, **E < geçiş enerjisi**)

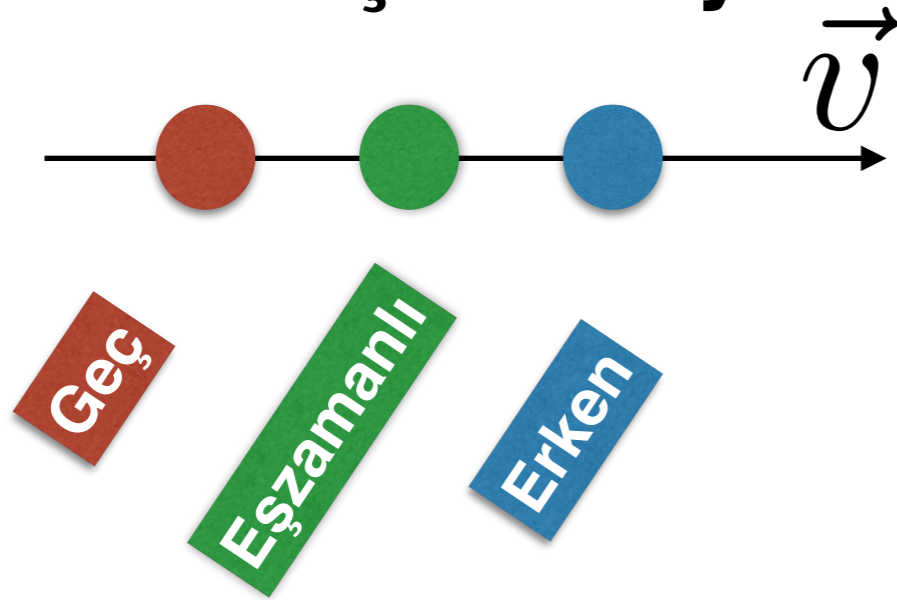


Soru: Eşzamanlı fazı tepenin solunu mu yoksa sağını mı seçelim?

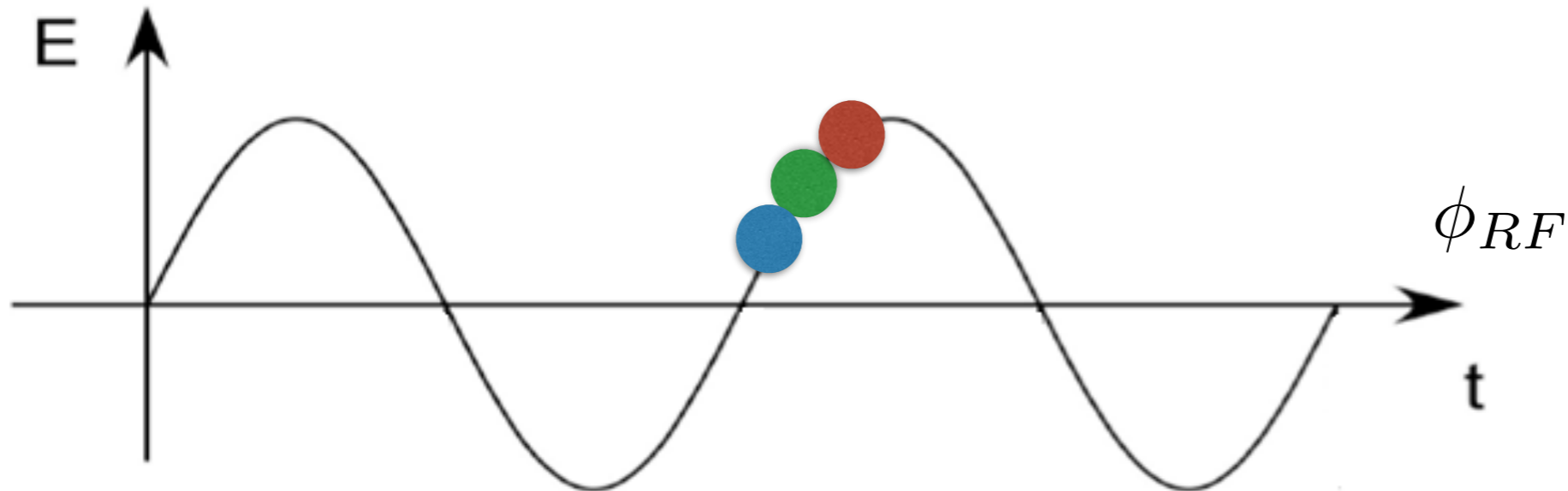


Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama  
(Eşzamanlayıcı, **E < geçiş enerjisi**)

**Gerçek uzay**

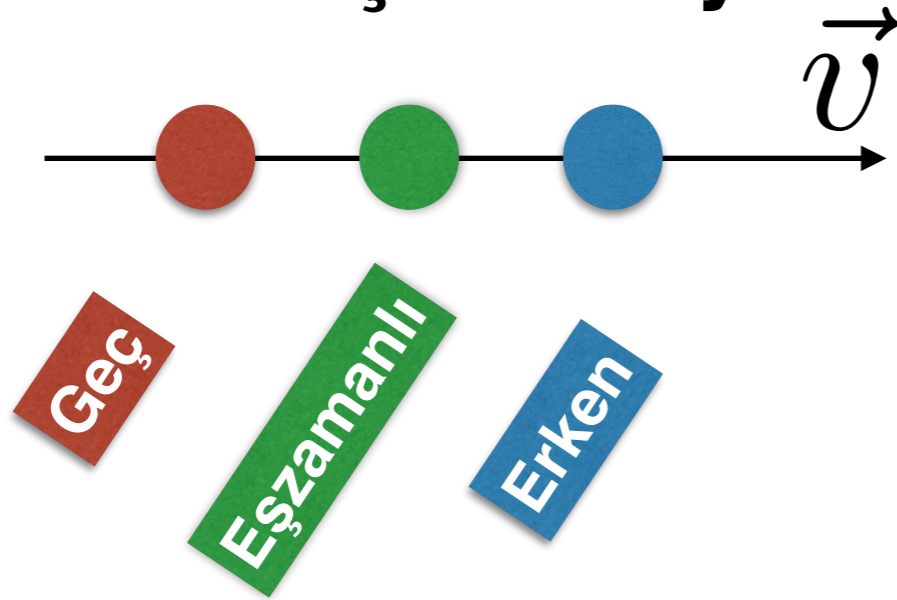


Soru: Eşzamanlı fazı tepenin solunu mu yoksa sağını mı seçelim?

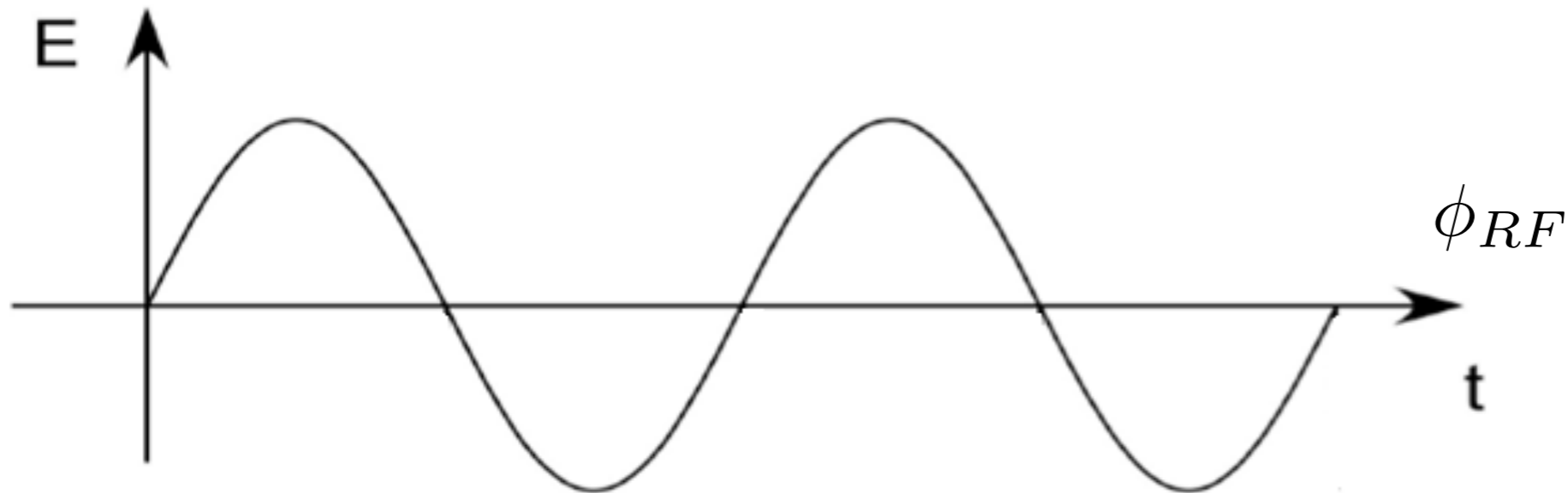


Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama  
(Eşzamanlayıcı, **E > geçiş enerjisi**)

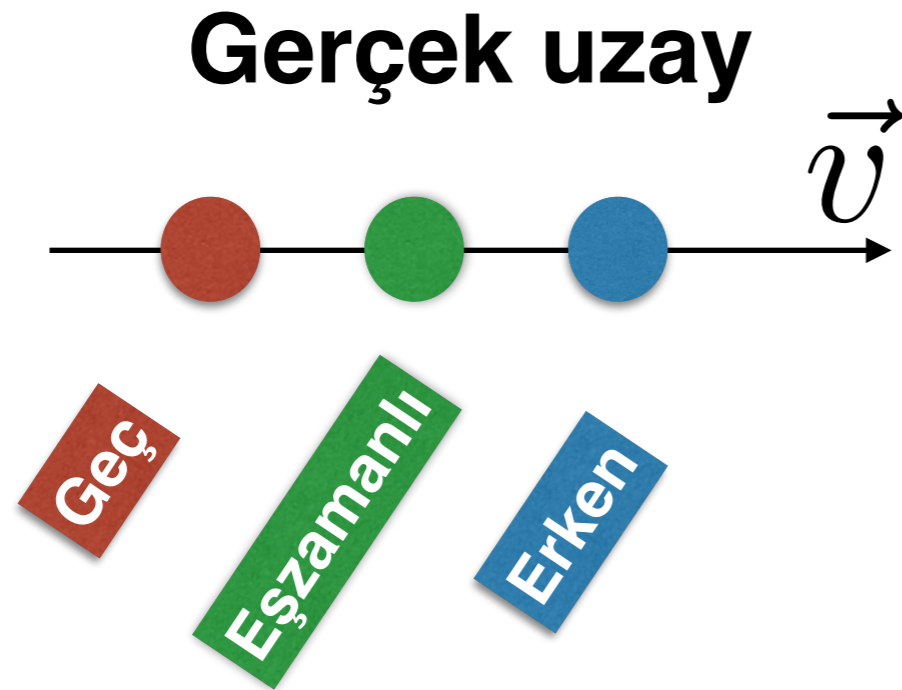
**Gerçek uzay**



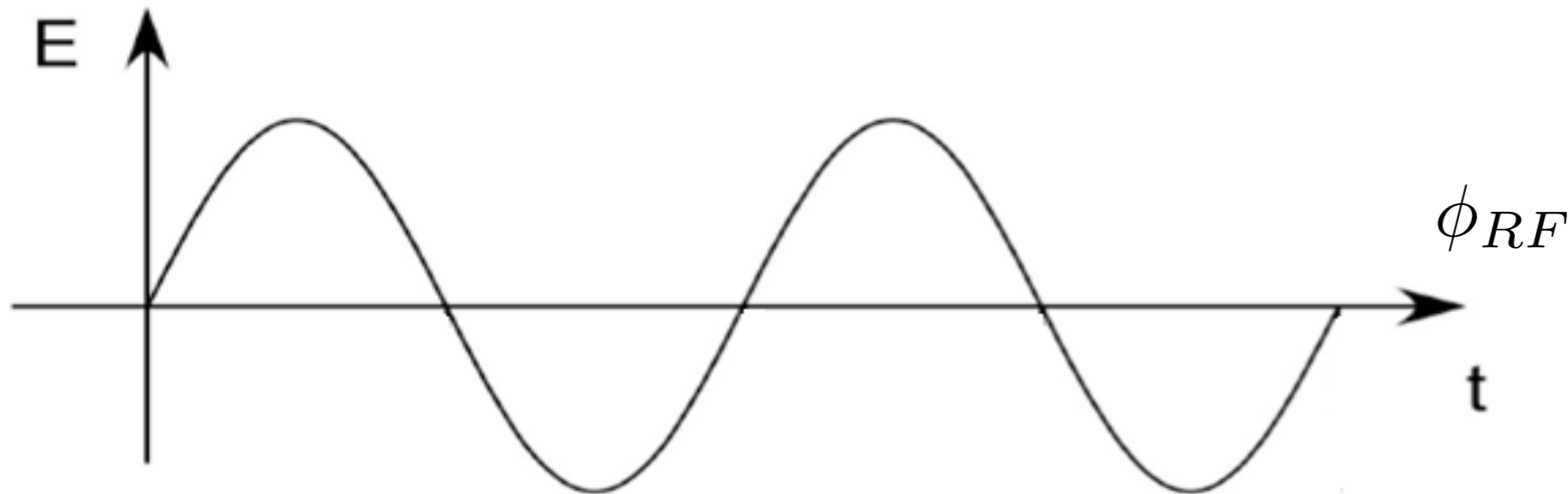
Soru: Eşzamanlı fazı tepenin solunu mu yoksa sağını mı seçelim?



Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama  
(Eşzamanlayıcı, **E > geçiş enerjisi**)

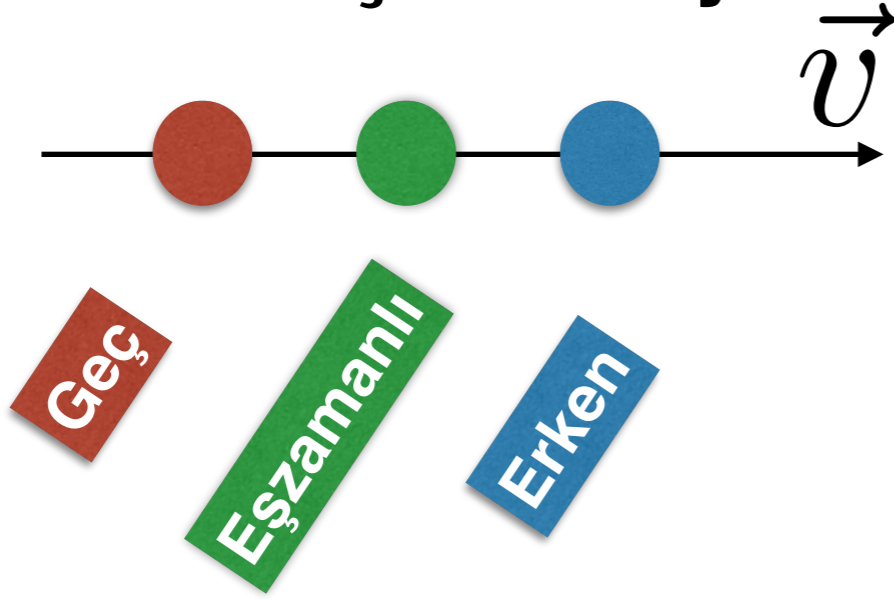


Soru: Eşzamanlı fazı tepenin solunu mu yoksa sağını mı seçelim?

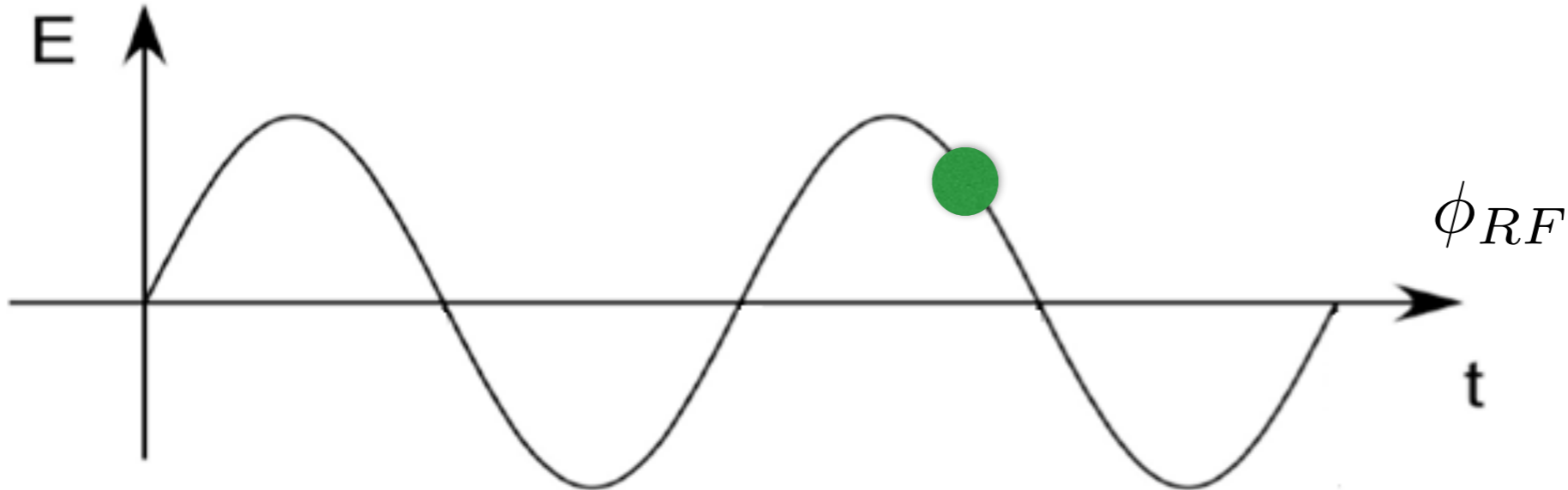


Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama  
(Eşzamanlayıcı, **E > geçiş enerjisi**)

**Gerçek uzay**

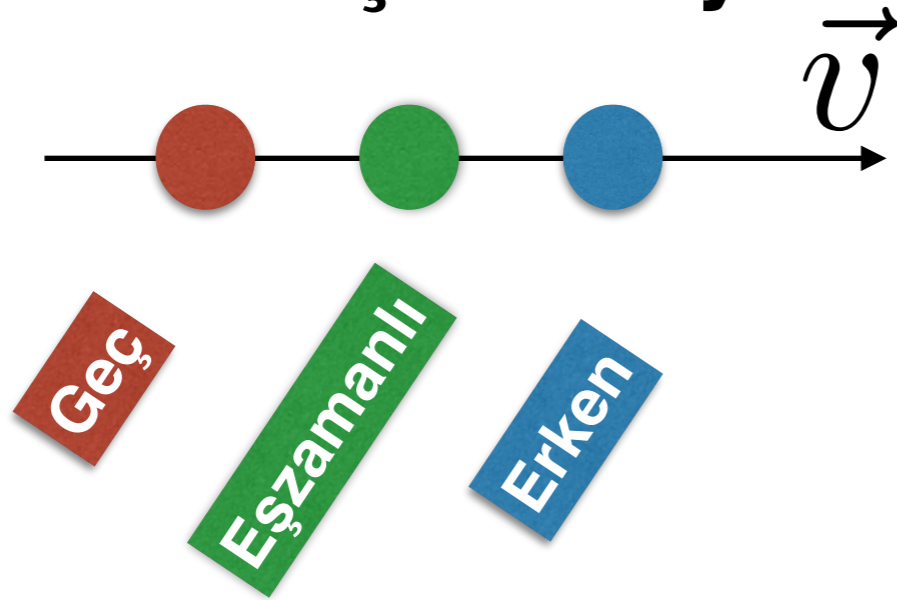


Soru: Eşzamanlı fazı tepenin solunu mu yoksa sağını mı seçelim?

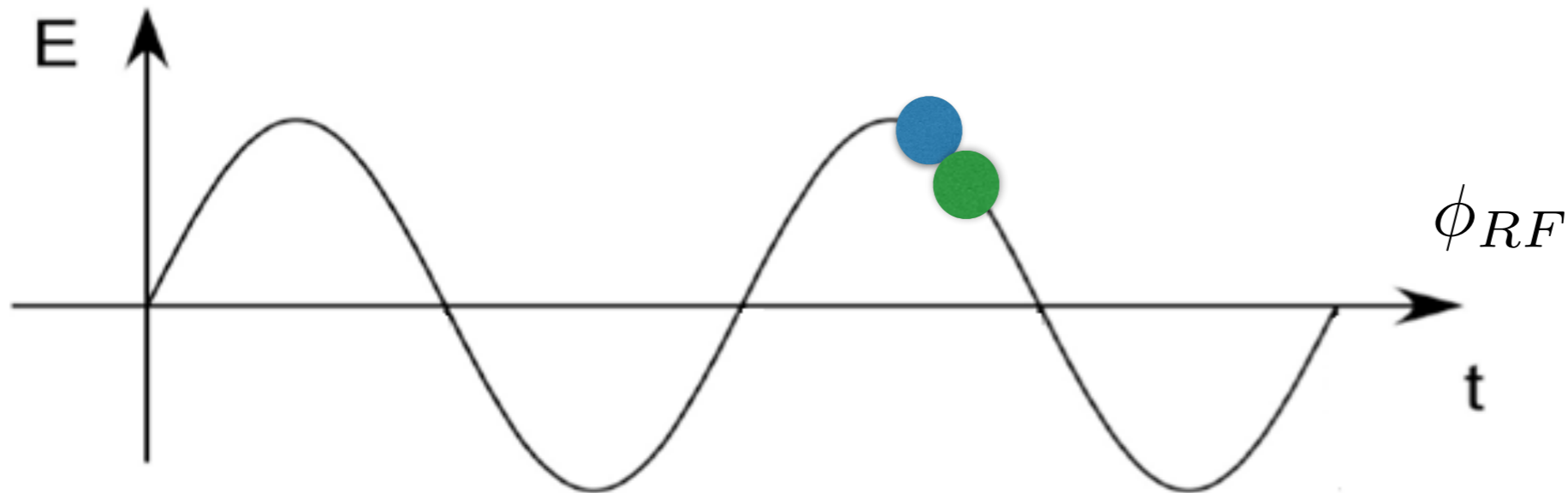


Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama  
(Eşzamanlayıcı, **E > geçiş enerjisi**)

**Gerçek uzay**

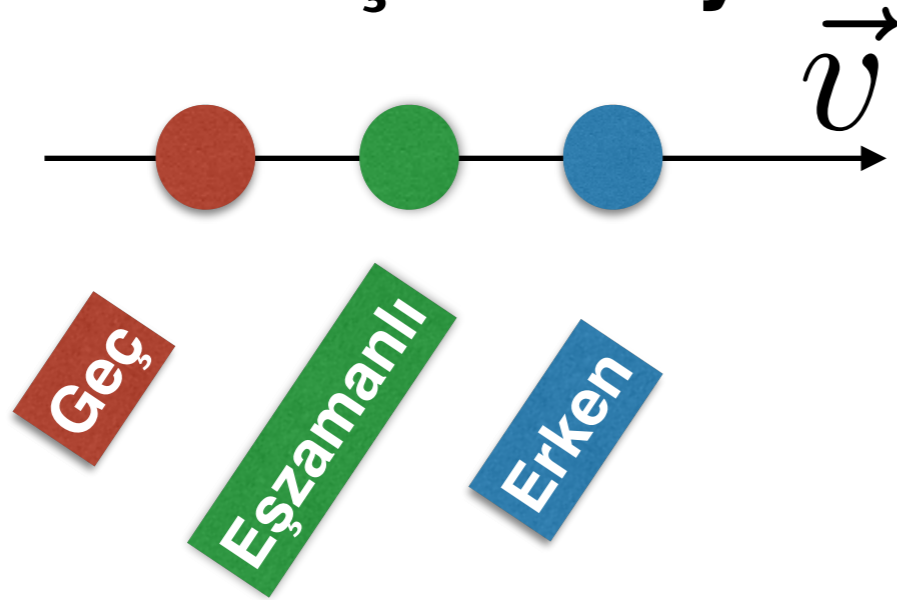


Soru: Eşzamanlı fazı tepenin solunu mu yoksa sağını mı seçelim?

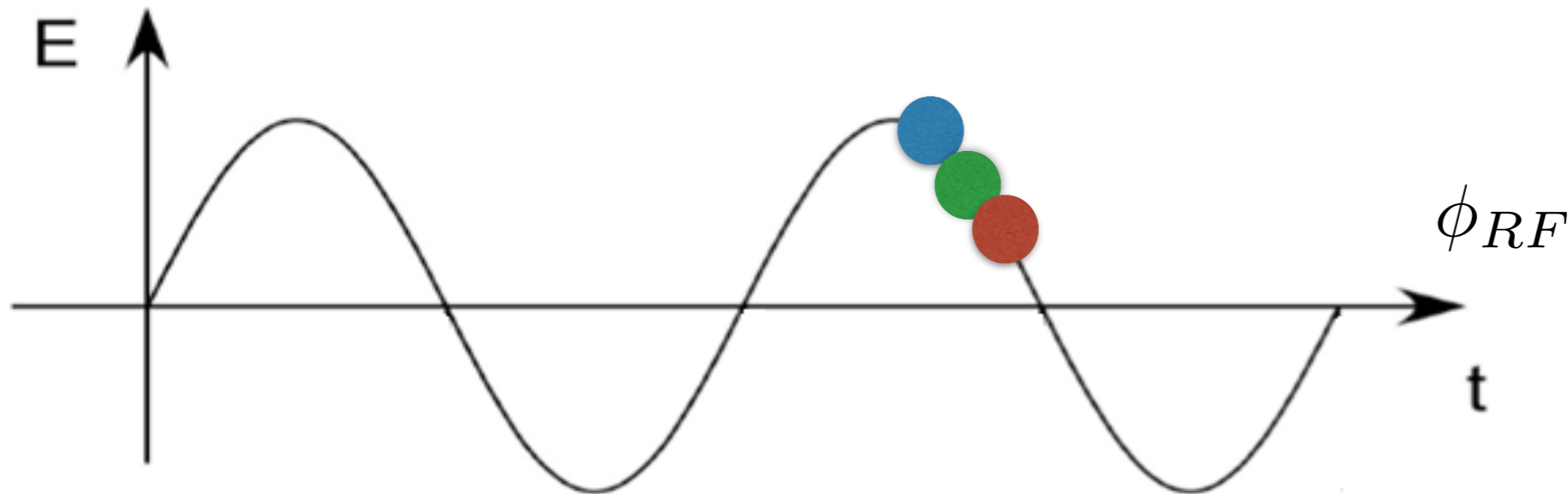


Hızlanırken RF fazı ile boyuna odaklama  
(Eşzamanlayıcı, **E > geçiş enerjisi**)

**Gerçek uzay**



Soru: Eşzamanlı fazı tepenin solunu mu yoksa sağını mı seçelim?



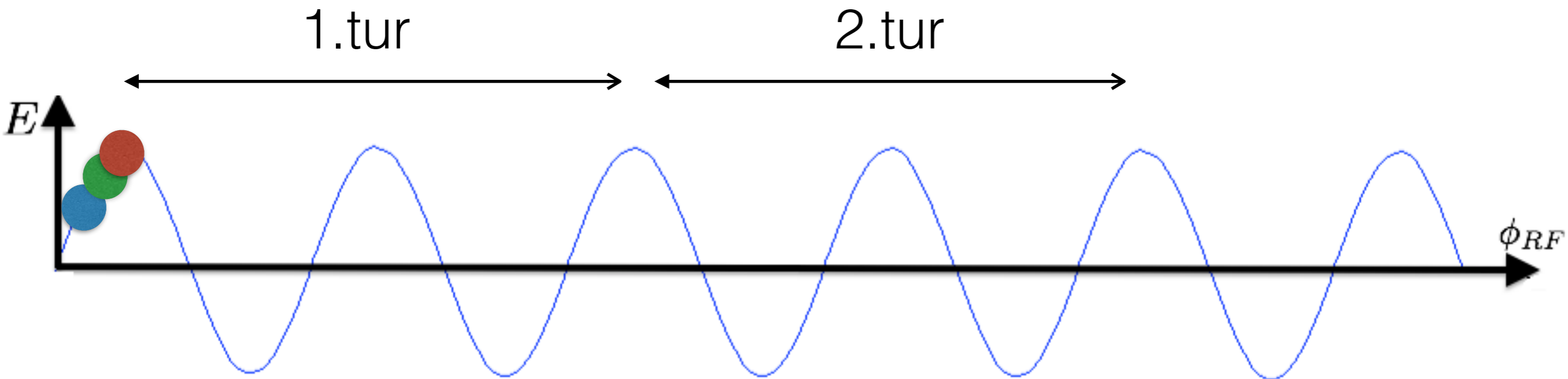
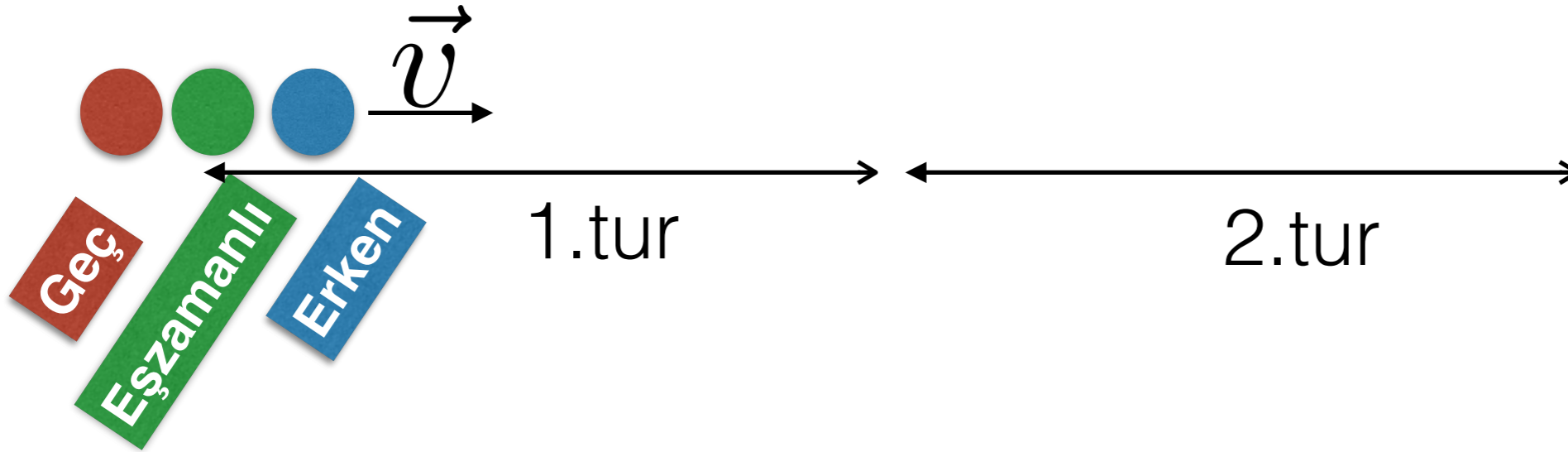
# Eşzamanlayıcı hareketi(synchrotron motion)

- Eşzamanlayıcı hareketi, bohça içerisindeki parçacıkların boyuna eksende yaptıkları salınımdır.
- Eşzamanlı parçacık her zaman aynı fazı (doğrusal hızlandırıcıların başında değişken olabilir) hisseder, hızlı veya yavaş parçacıkların fazı değişir.
- Bütün parçacıklar eşzamanlı parçacık etrafında salınım yaparlar.



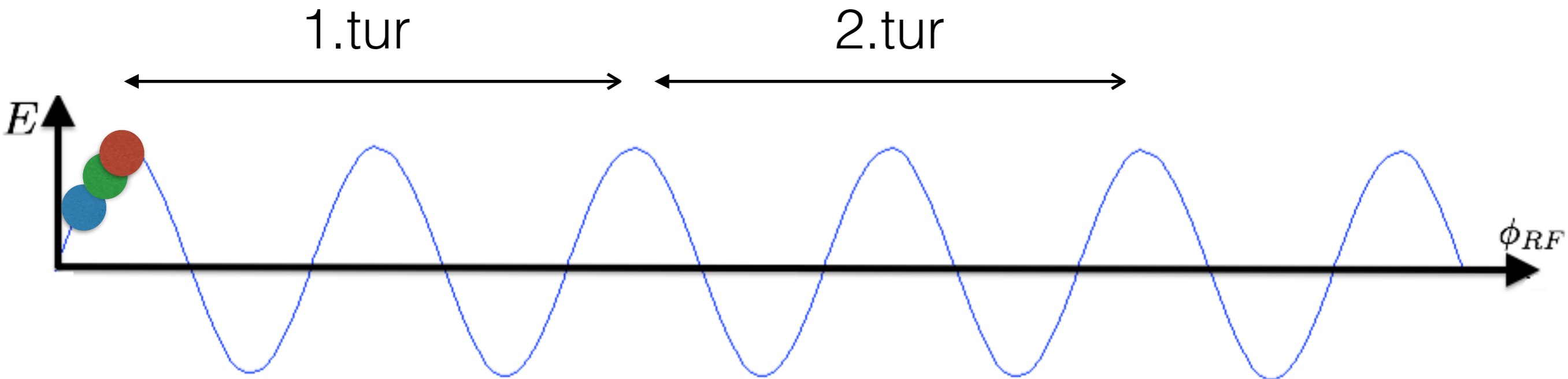
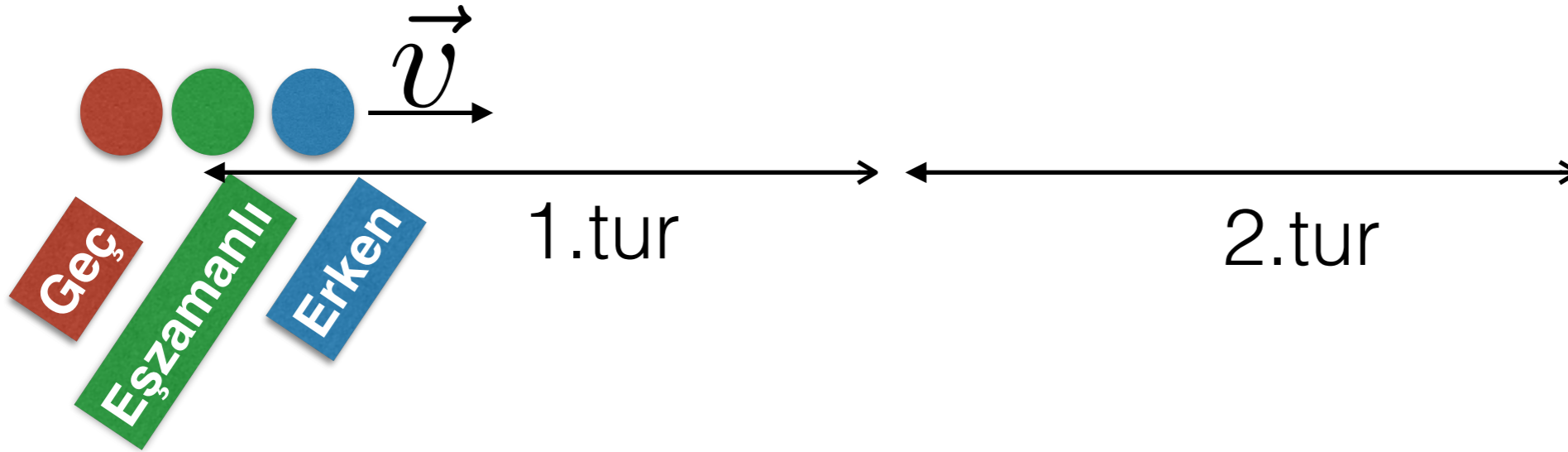
Eşzamanlayıcı hareketi(synchrotron motion)  
Eşzamanlayıcı etrafında birkaç tur **E < geçiş enerjisi.**

## Gerçek uzay



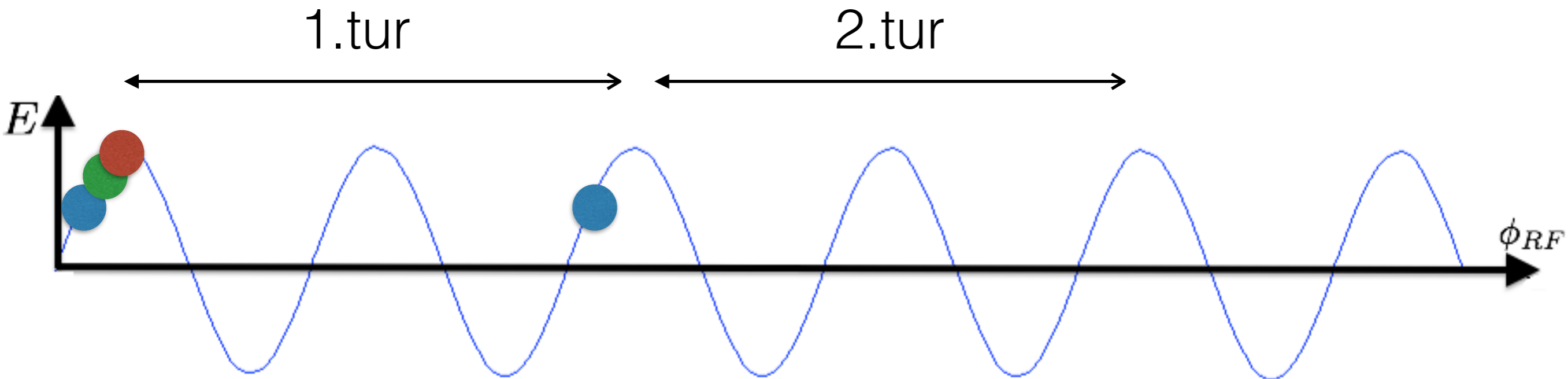
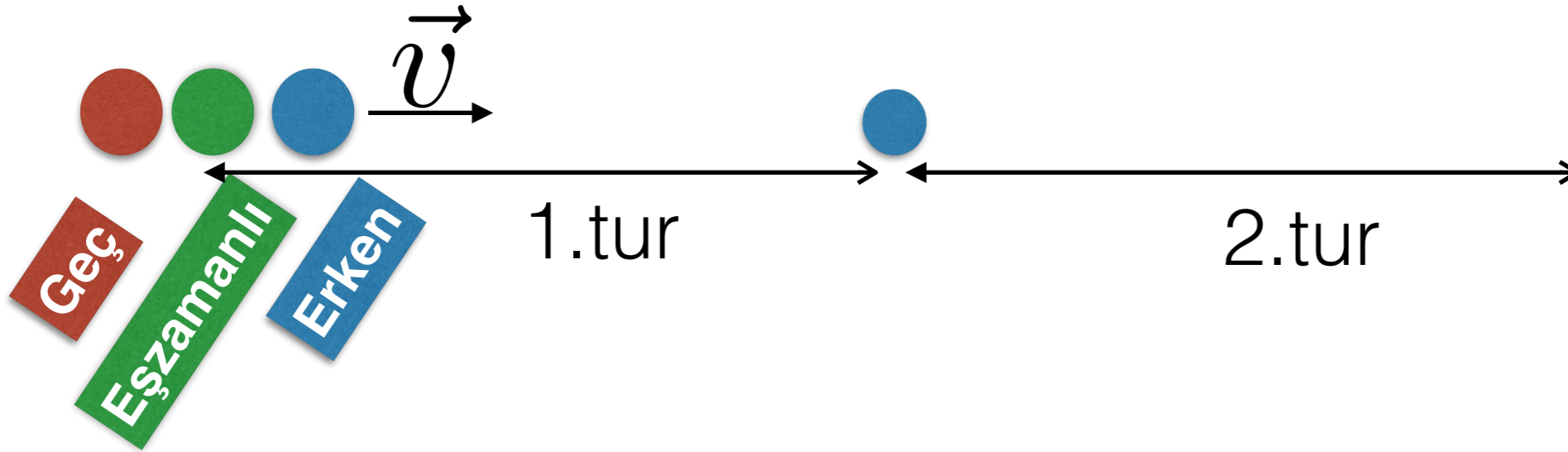
Eşzamanlayıcı hareketi(synchrotron motion)  
Eşzamanlayıcı etrafında birkaç tur **E < geçiş enerjisi.**

## Gerçek uzay



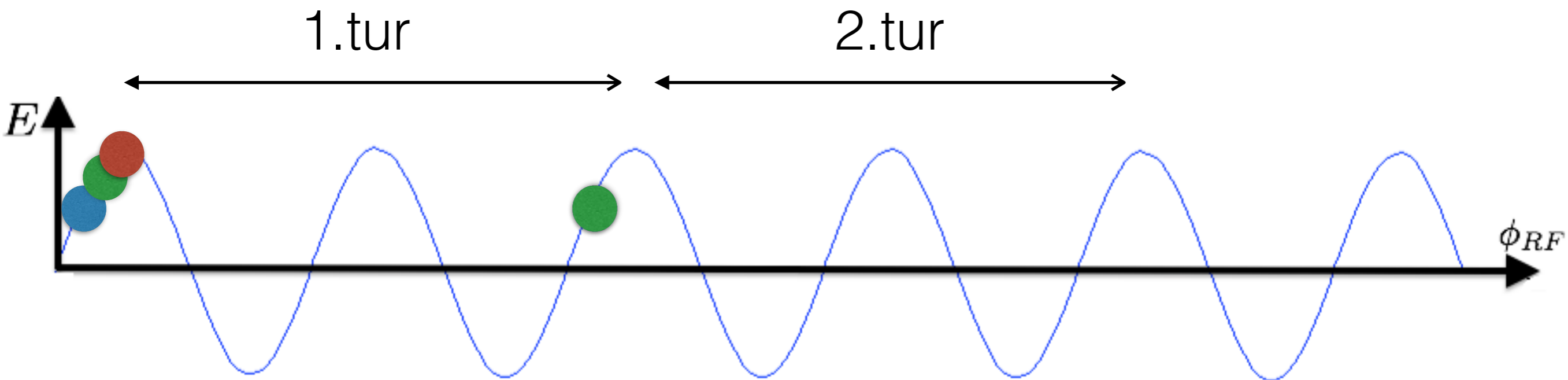
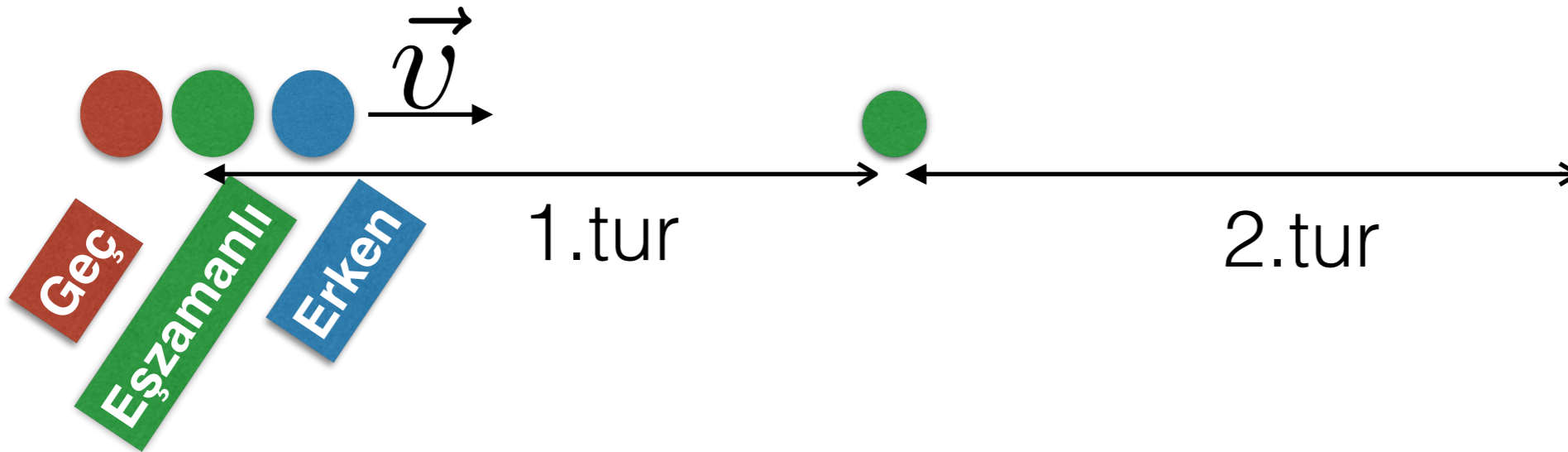
Eşzamanlayıcı hareketi(synchrotron motion)  
Eşzamanlayıcı etrafında birkaç tur **E < geçiş enerjisi.**

## Gerçek uzay



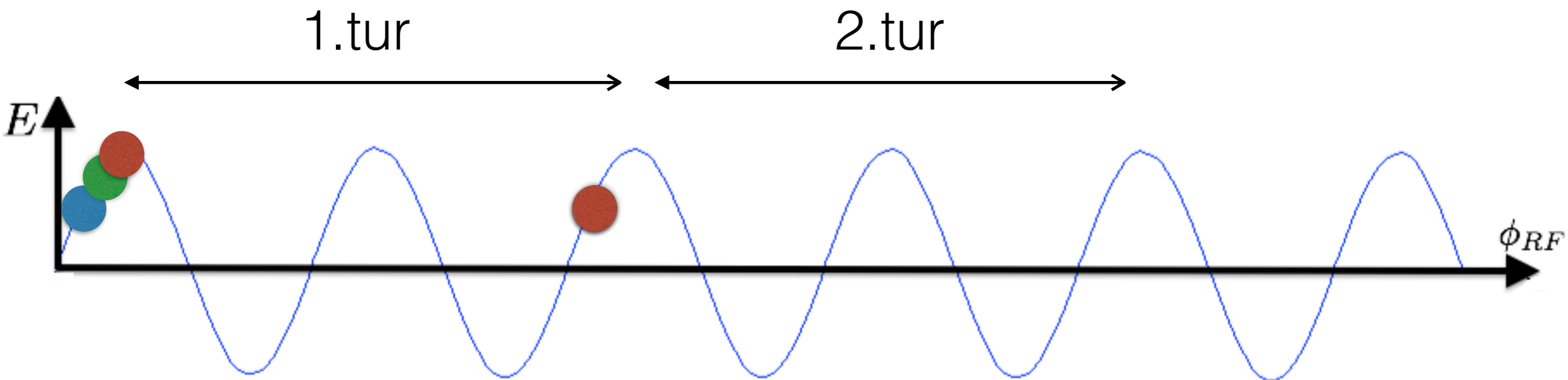
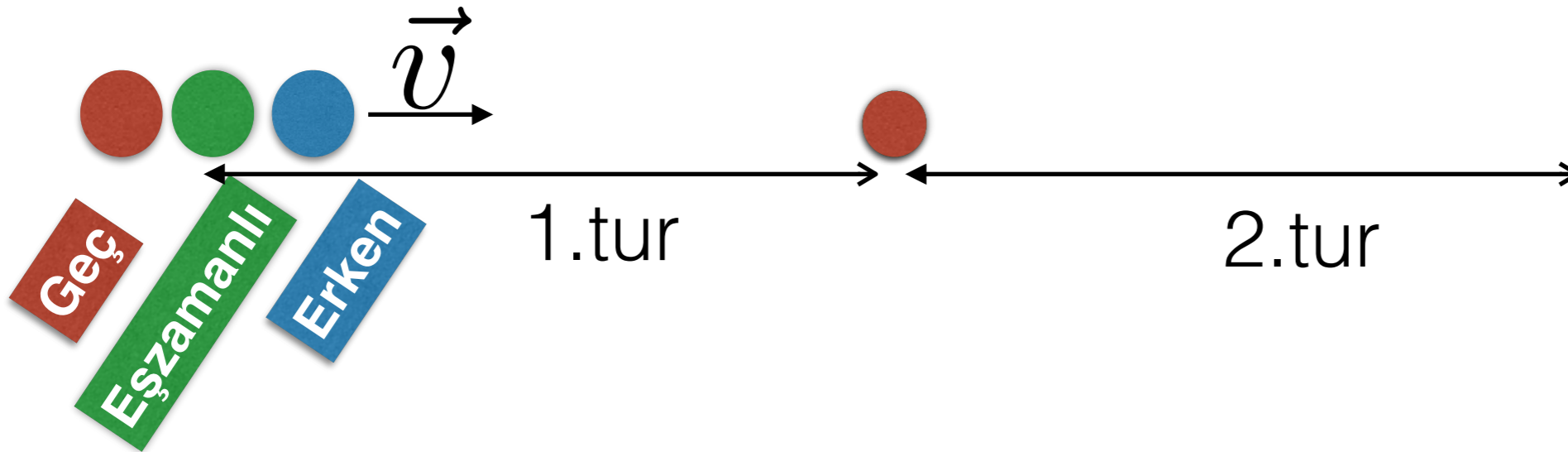
Eşzamanlayıcı hareketi(synchrotron motion)  
Eşzamanlayıcı etrafında birkaç tur **E < geçiş enerjisi.**

## Gerçek uzay



Eşzamanlayıcı hareketi(synchrotron motion)  
Eşzamanlayıcı etrafında birkaç tur **E < geçiş enerjisi.**

## Gerçek uzay

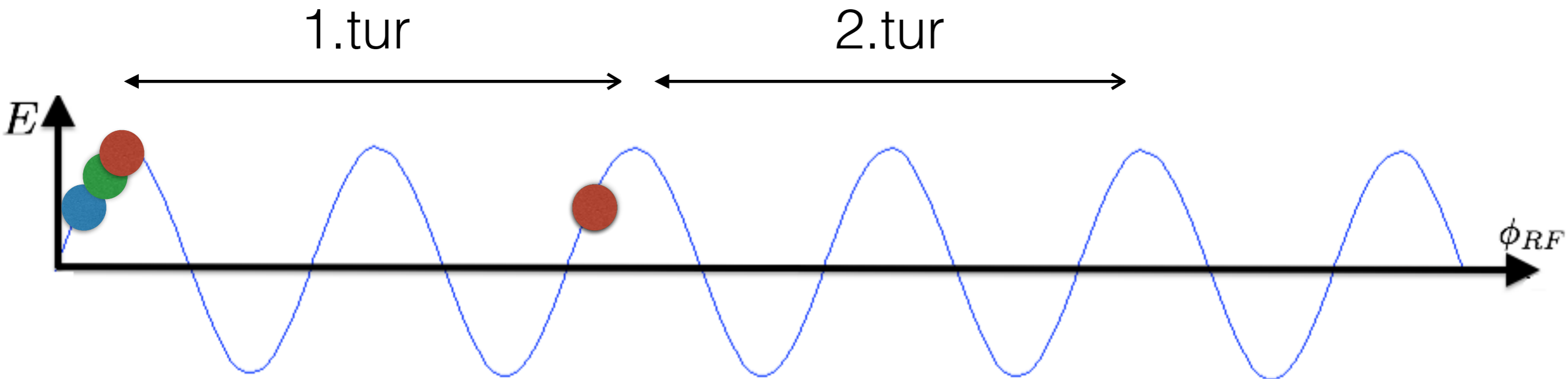


Eşzamanlayıcı hareketi(synchrotron motion)  
Eşzamanlayıcı etrafında birkaç tur **E < geçiş enerjisi.**

## Gerçek uzay

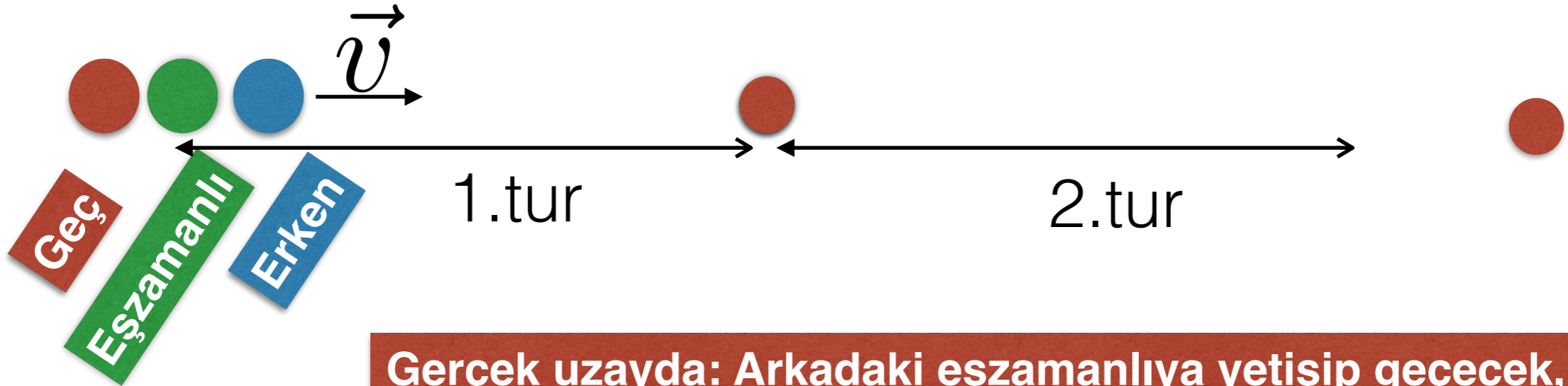


Gerçek uzayda: Arkadaki eşzamanlıya yetişip geçecek, öndeki yavaşlayıp eşzamanlının arkasında kalacak

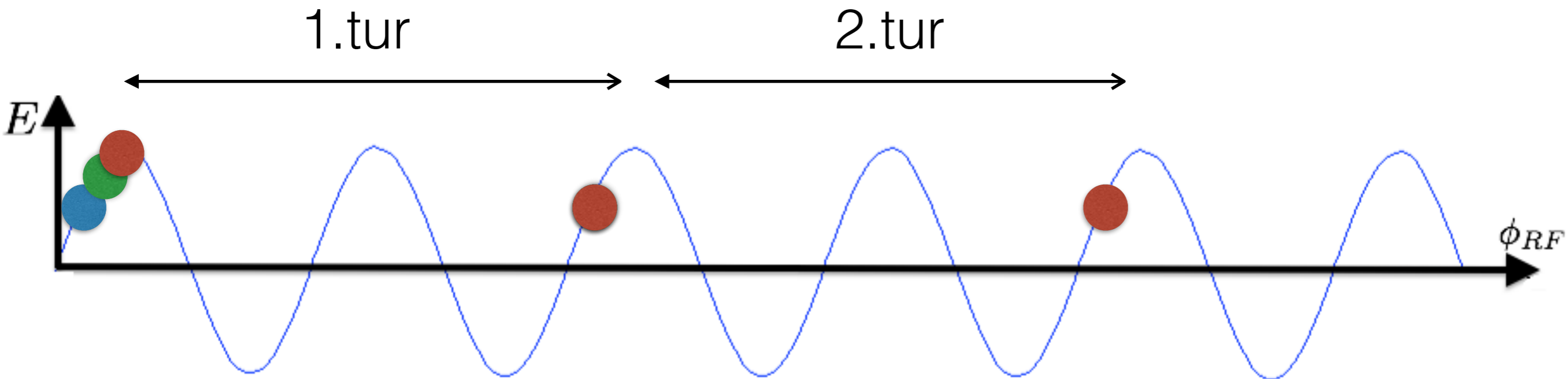


Eşzamanlayıcı hareketi(synchrotron motion)  
Eşzamanlayıcı etrafında birkaç tur **E < geçiş enerjisi.**

## Gerçek uzay

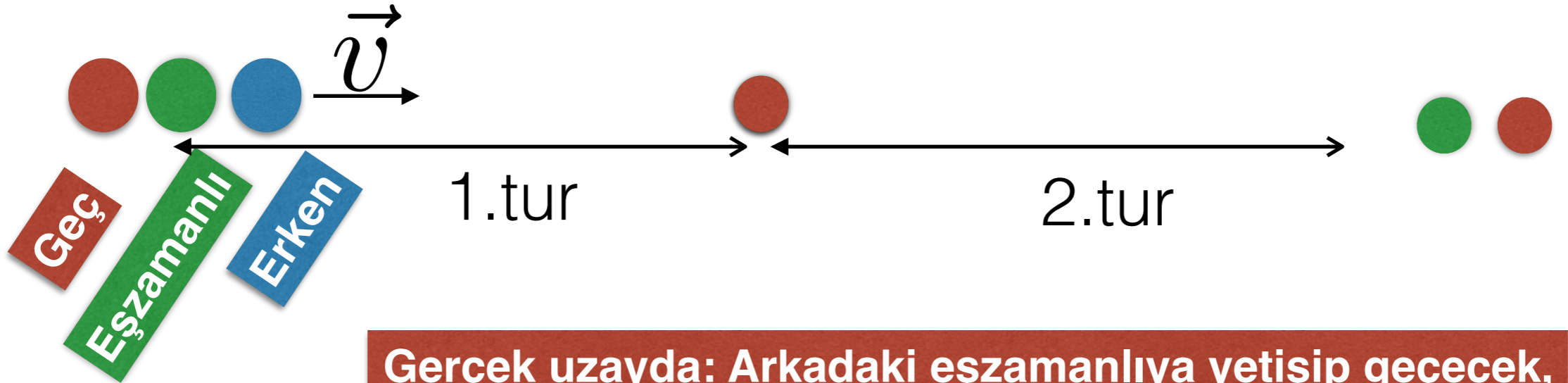


Gerçek uzayda: Arkadaki eşzamanlıya yetişip geçecek, öndeki yavaşlayıp eşzamanlının arkasında kalacak

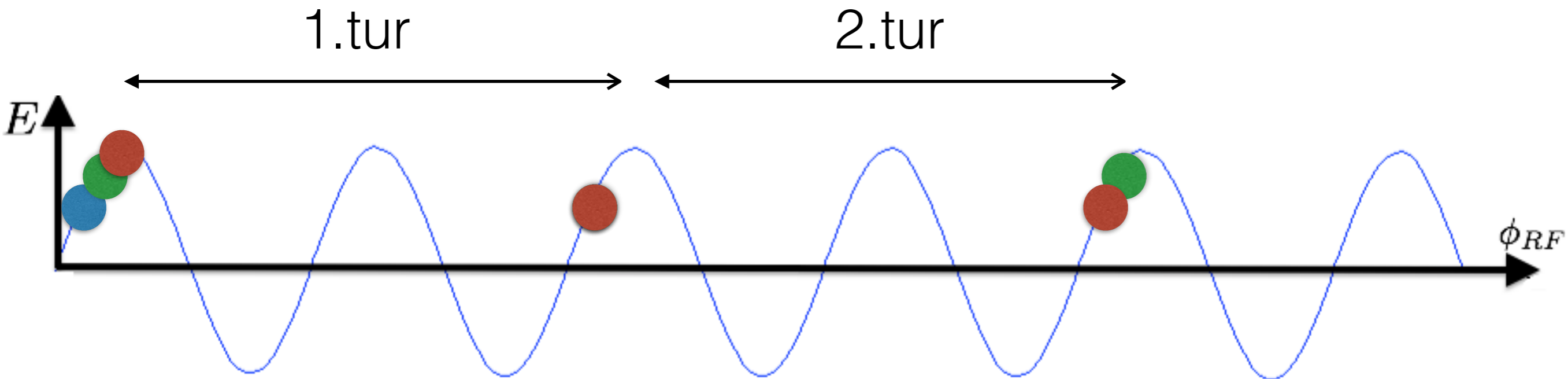


Eşzamanlayıcı hareketi(synchrotron motion)  
Eşzamanlayıcı etrafında birkaç tur **E < geçiş enerjisi.**

## Gerçek uzay



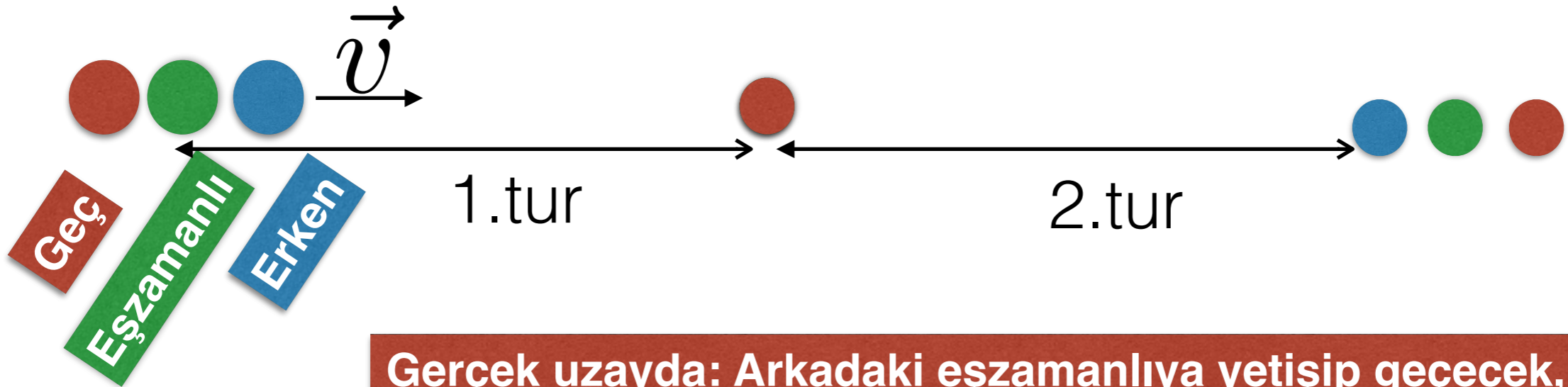
Gerçek uzayda: Arkadaki eşzamanlıya yetişip geçecek, öndeki yavaşlayıp eşzamanlının arkasında kalacak



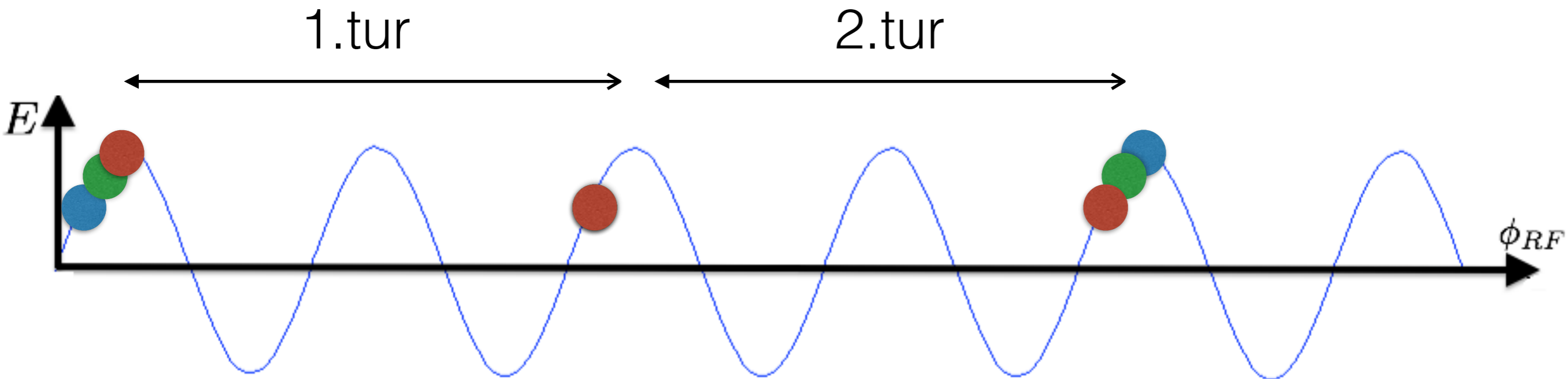


Eşzamanlayıcı hareketi(synchrotron motion)  
Eşzamanlayıcı etrafında birkaç tur **E < geçiş enerjisi.**

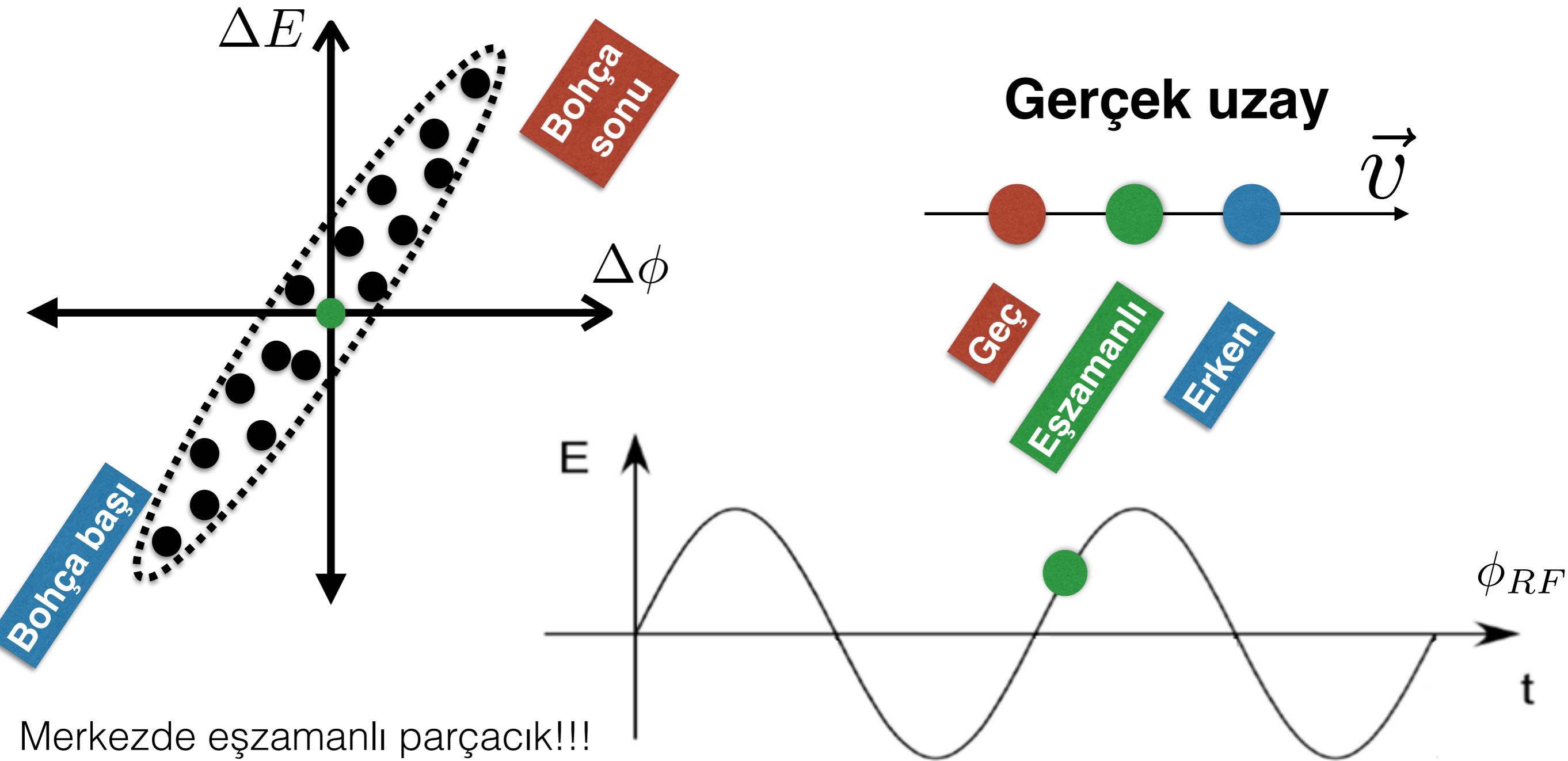
## Gerçek uzay



Gerçek uzayda: Arkadaki eşzamanlıya yetişip geçecek, öndeki yavaşlayıp eşzamanlının arkasında kalacak

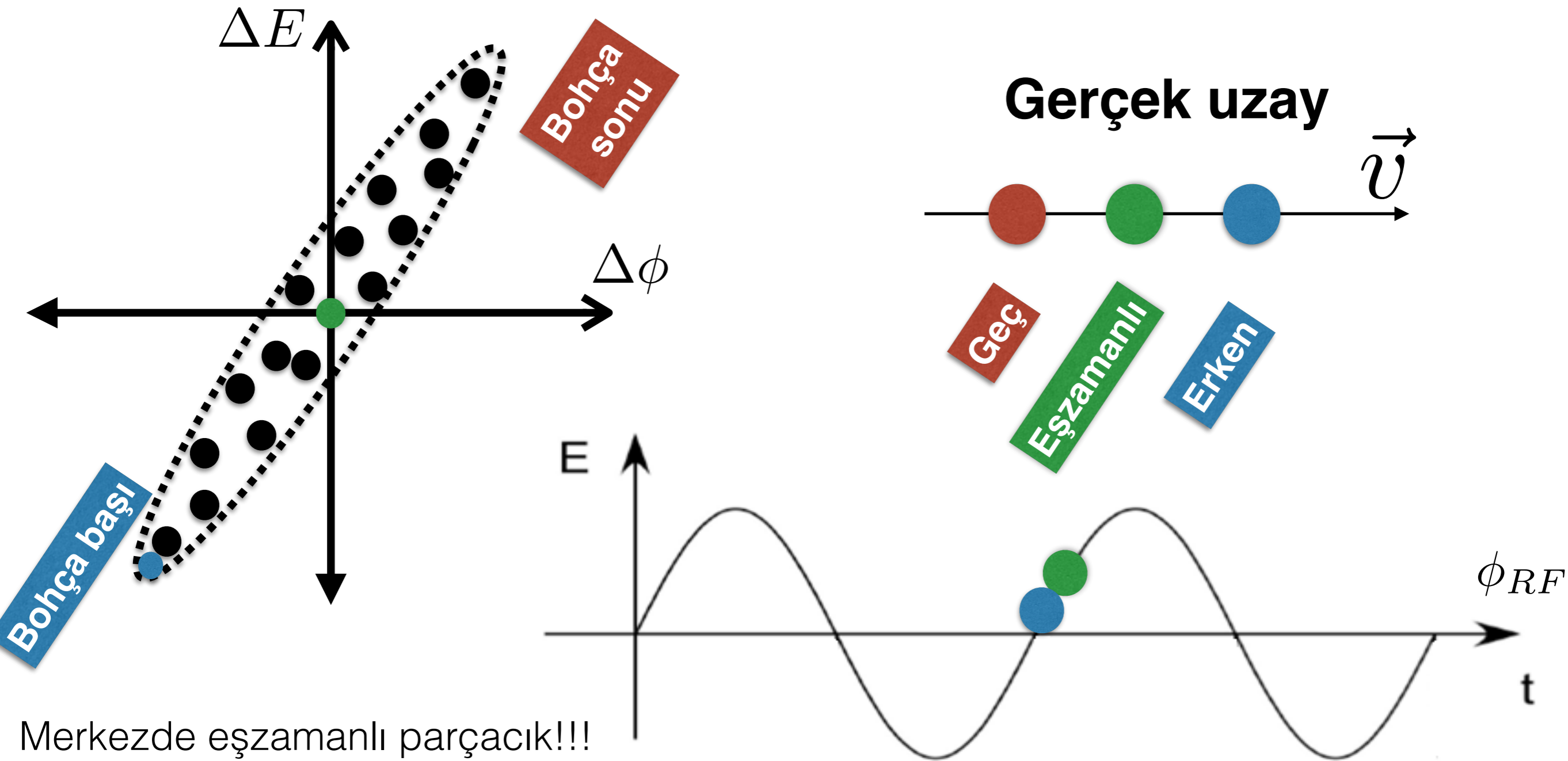


# Boyuna eksende faz uzayı



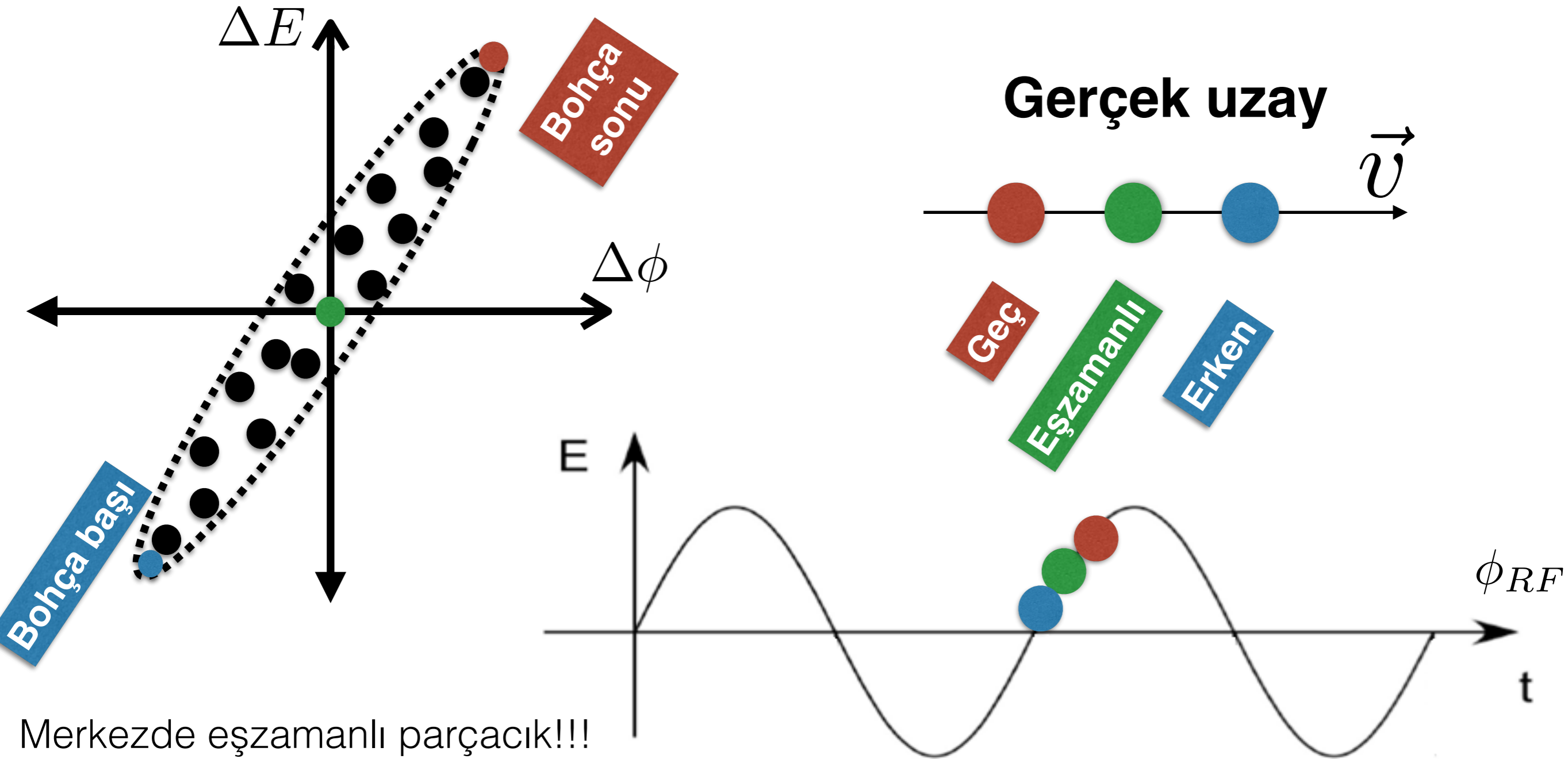
Merkezde eşzamanlı parçacık!!!  
Bohçadaki bütün parçacıklar  
için bir nokta var.  
Enerji farkı ve faz farkı!!!

# Boyuna ekseninde faz uzayı



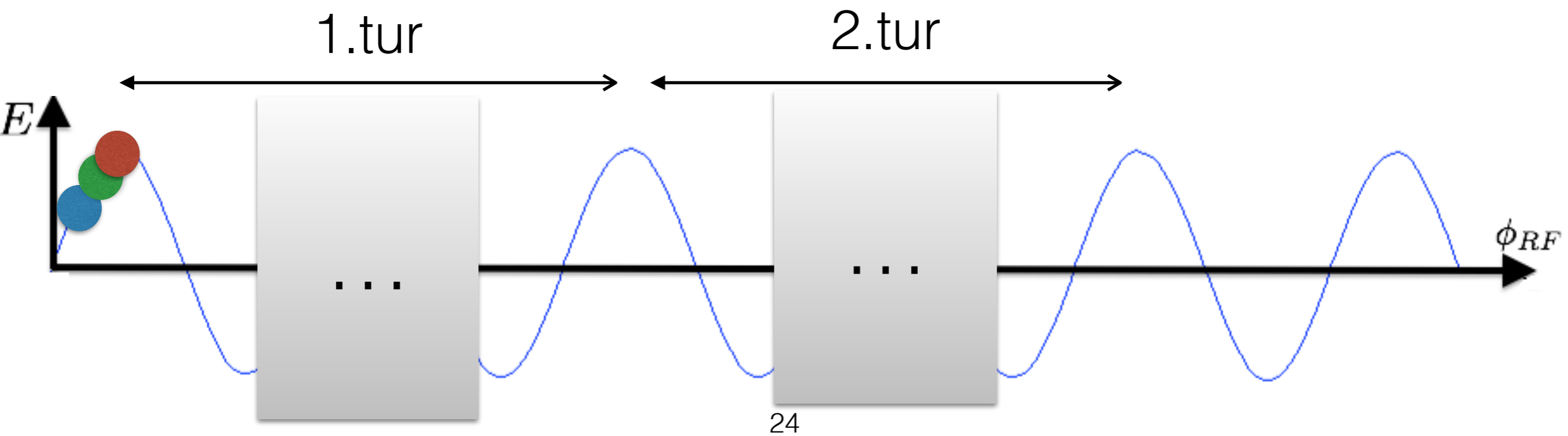
Merkezde eşzamanlı parçacık!!!  
Bohçadaki bütün parçacıklar  
için bir nokta var.  
Enerji farkı ve faz farkı!!!

# Boyuna ekseninde faz uzayı

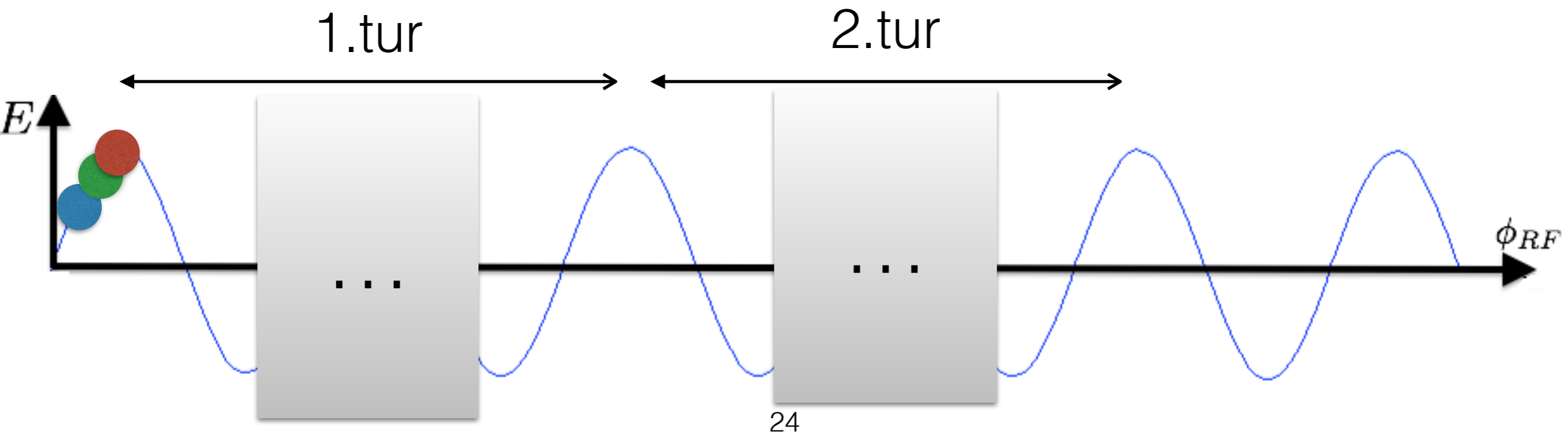
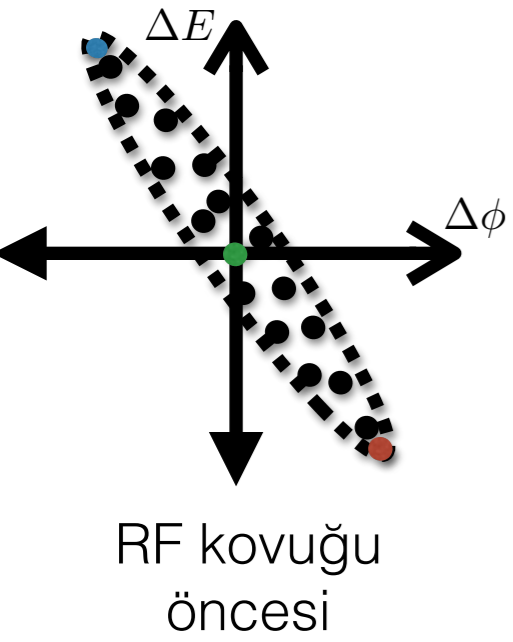


Merkezde eşzamanlı parçacık!!!  
Bohçadaki bütün parçacıklar  
için bir nokta var.  
Enerji farkı ve faz farkı!!!

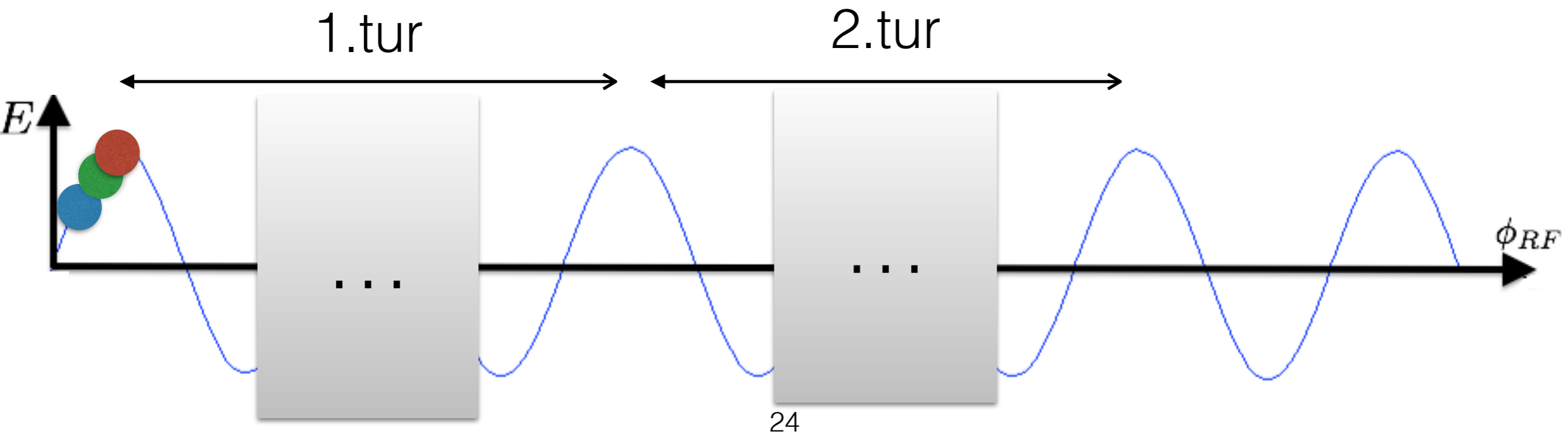
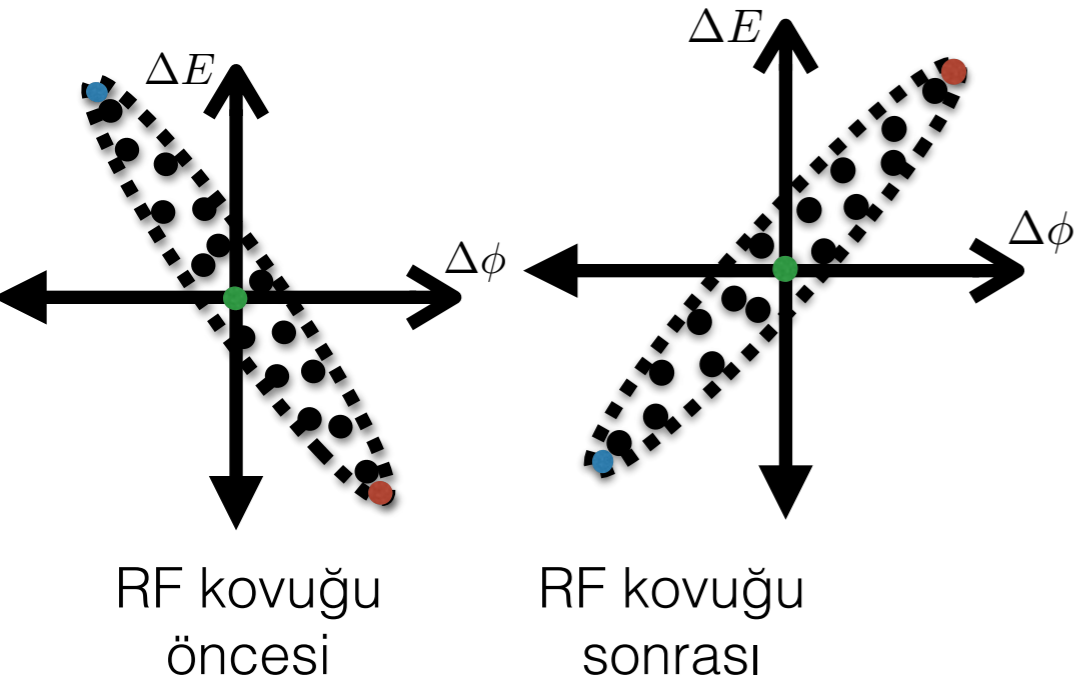
Boyuna eksende faz uzayı (**eşzamanlayıcı etrafında**)



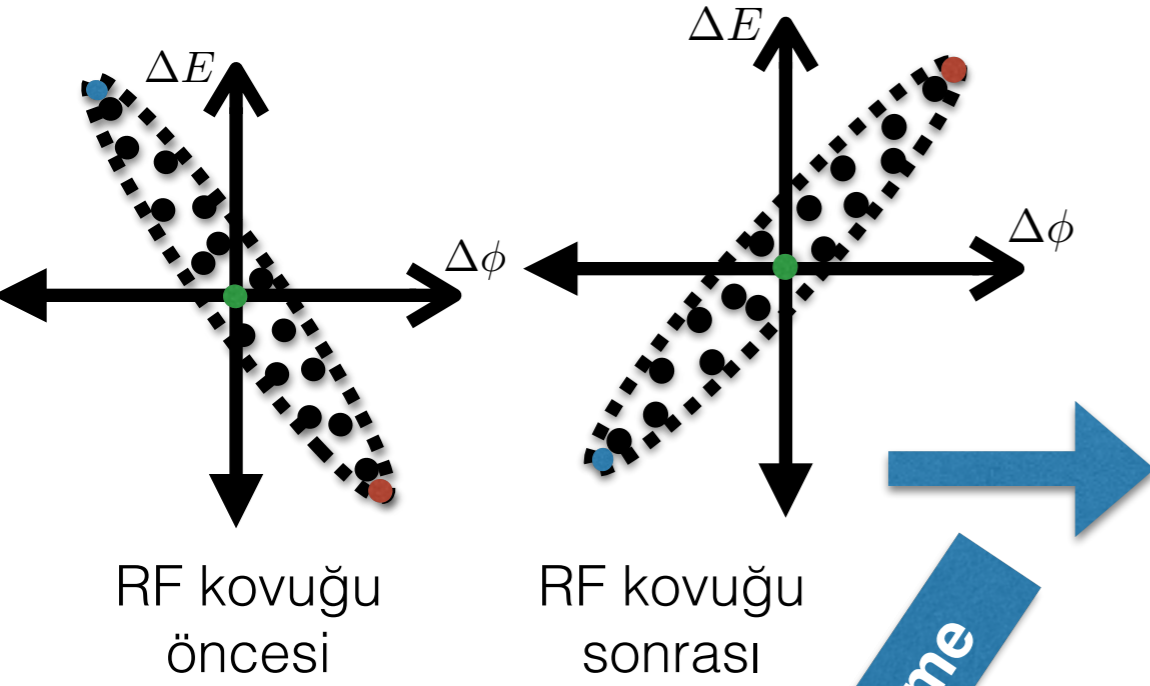
# Boyuna eksende faz uzayı (**eşzamanlayıcı etrafında**)



# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)

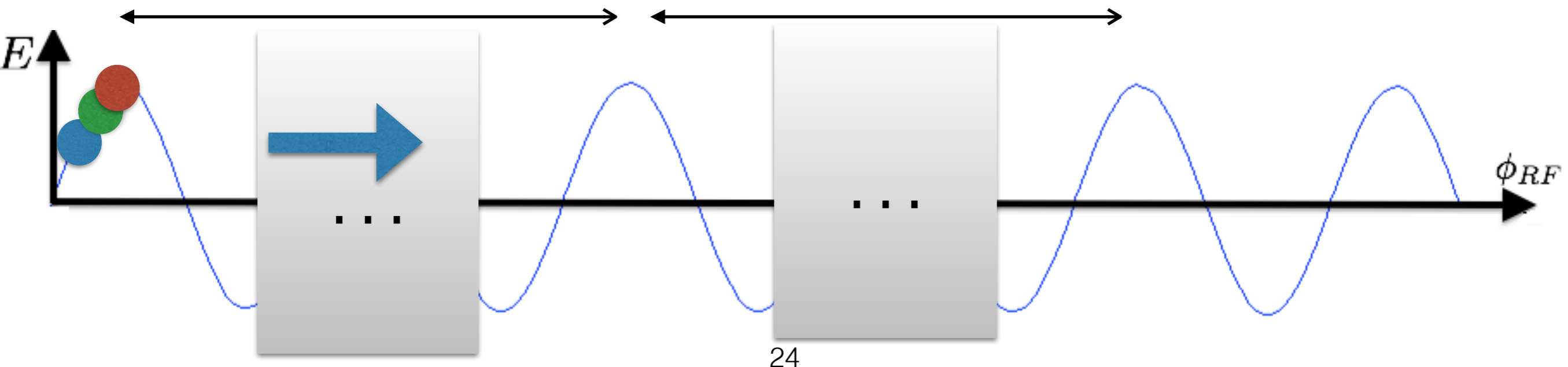


# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)



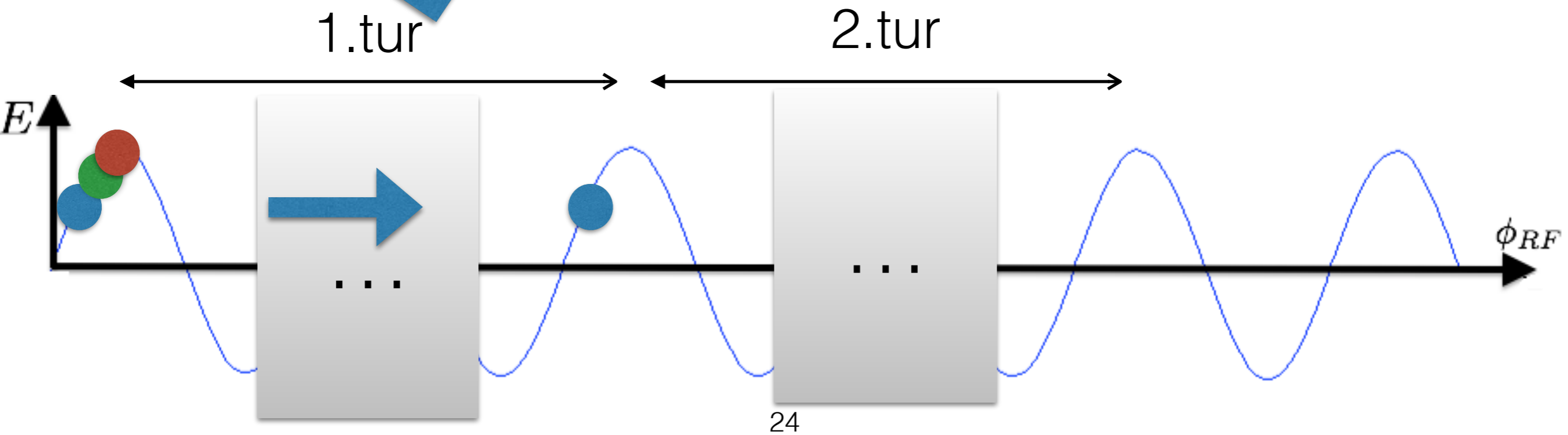
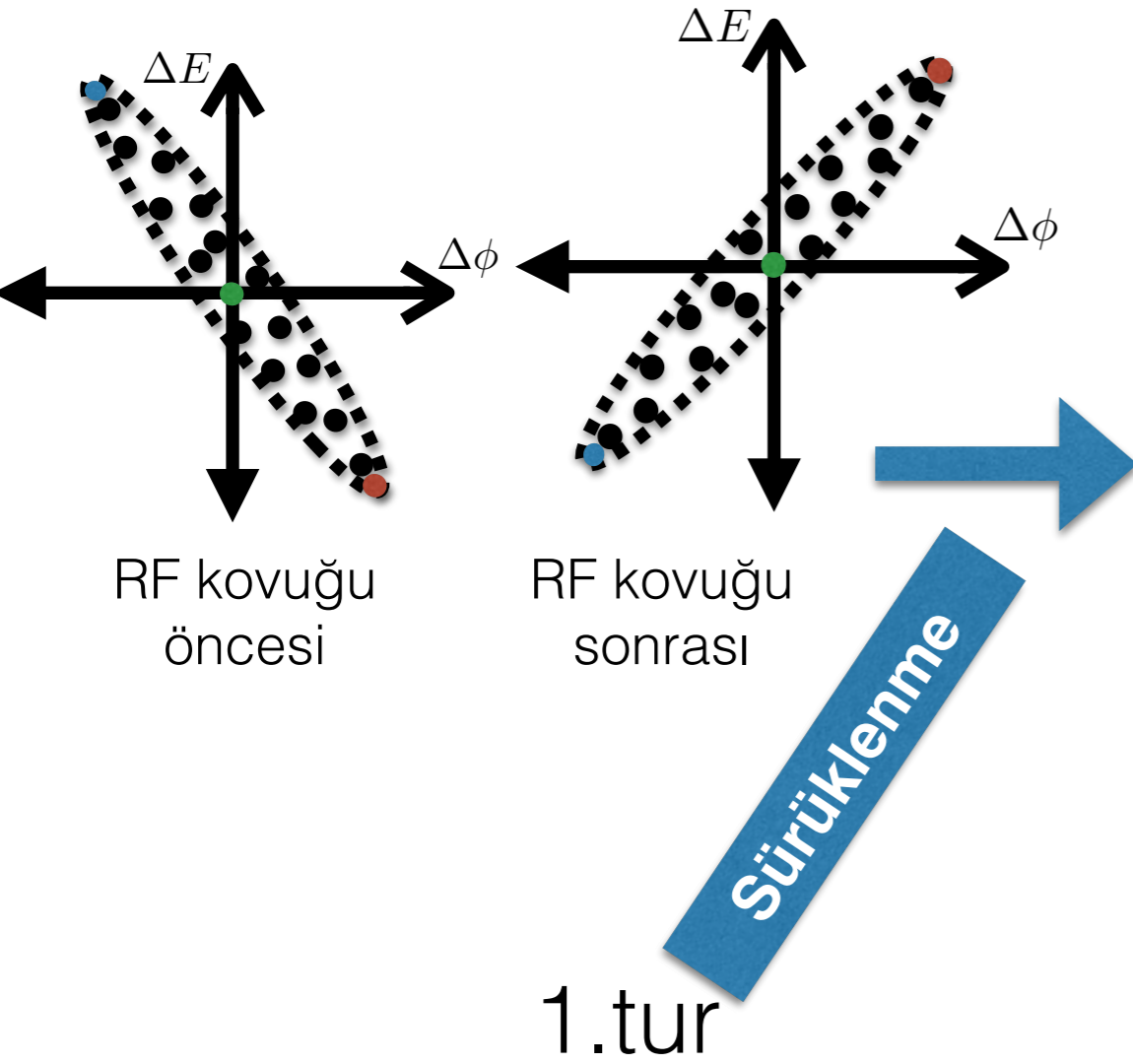
1.tur

2.tur

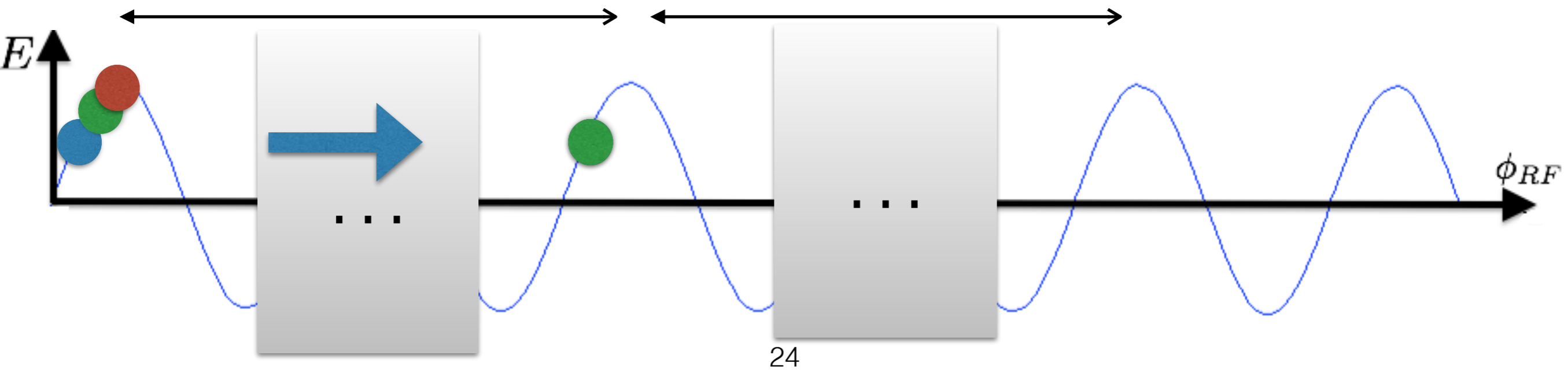
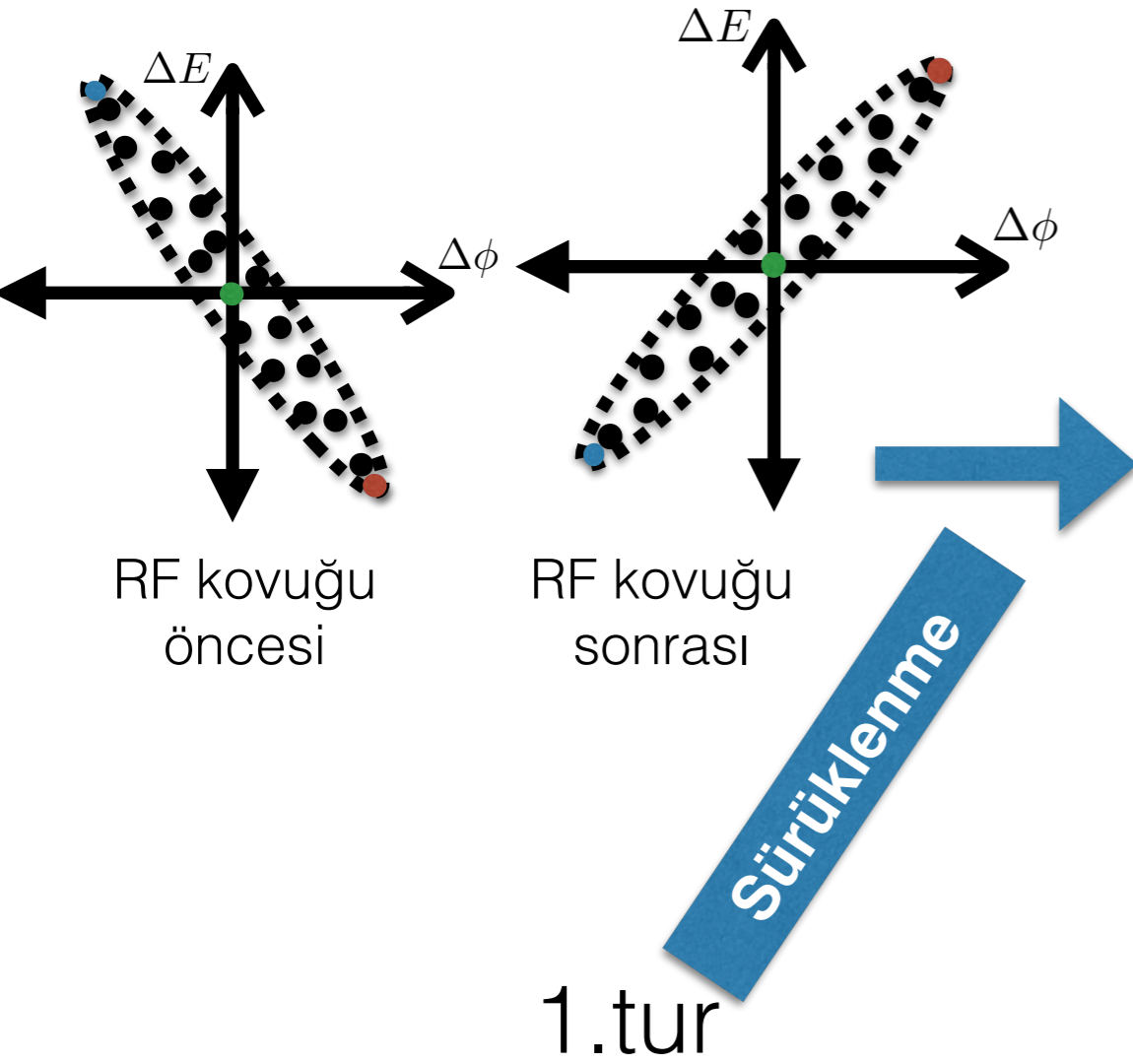




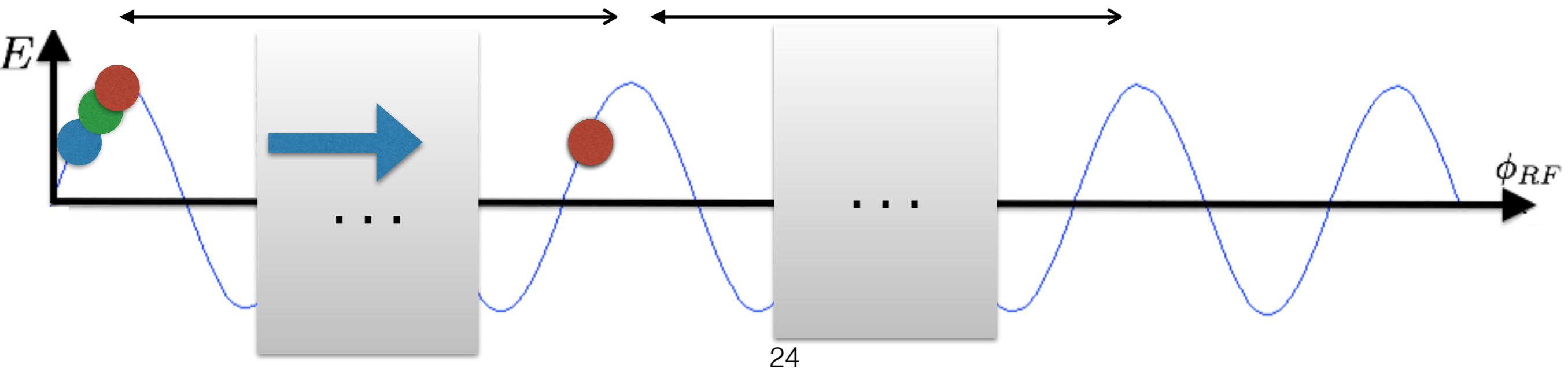
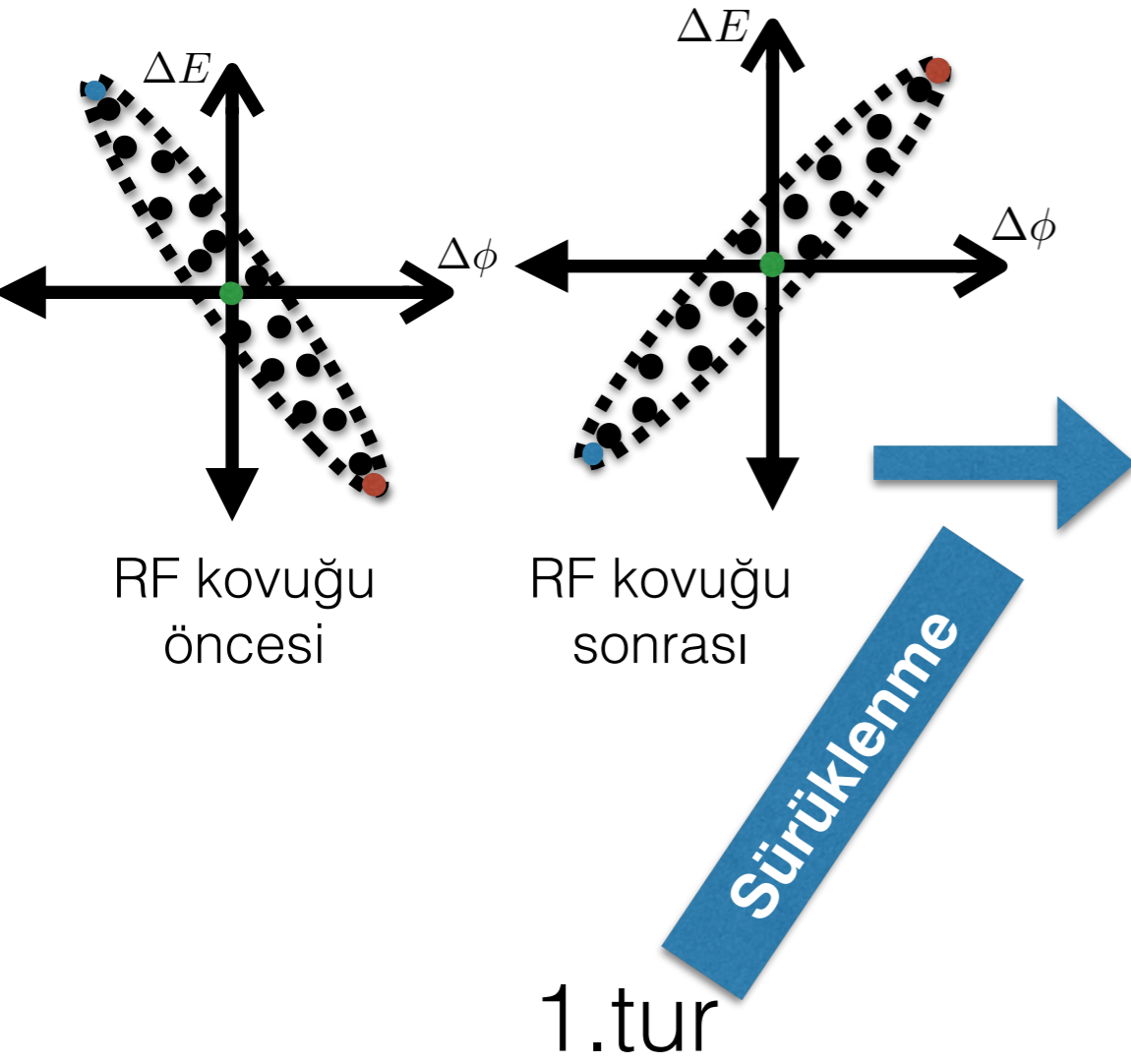
# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)



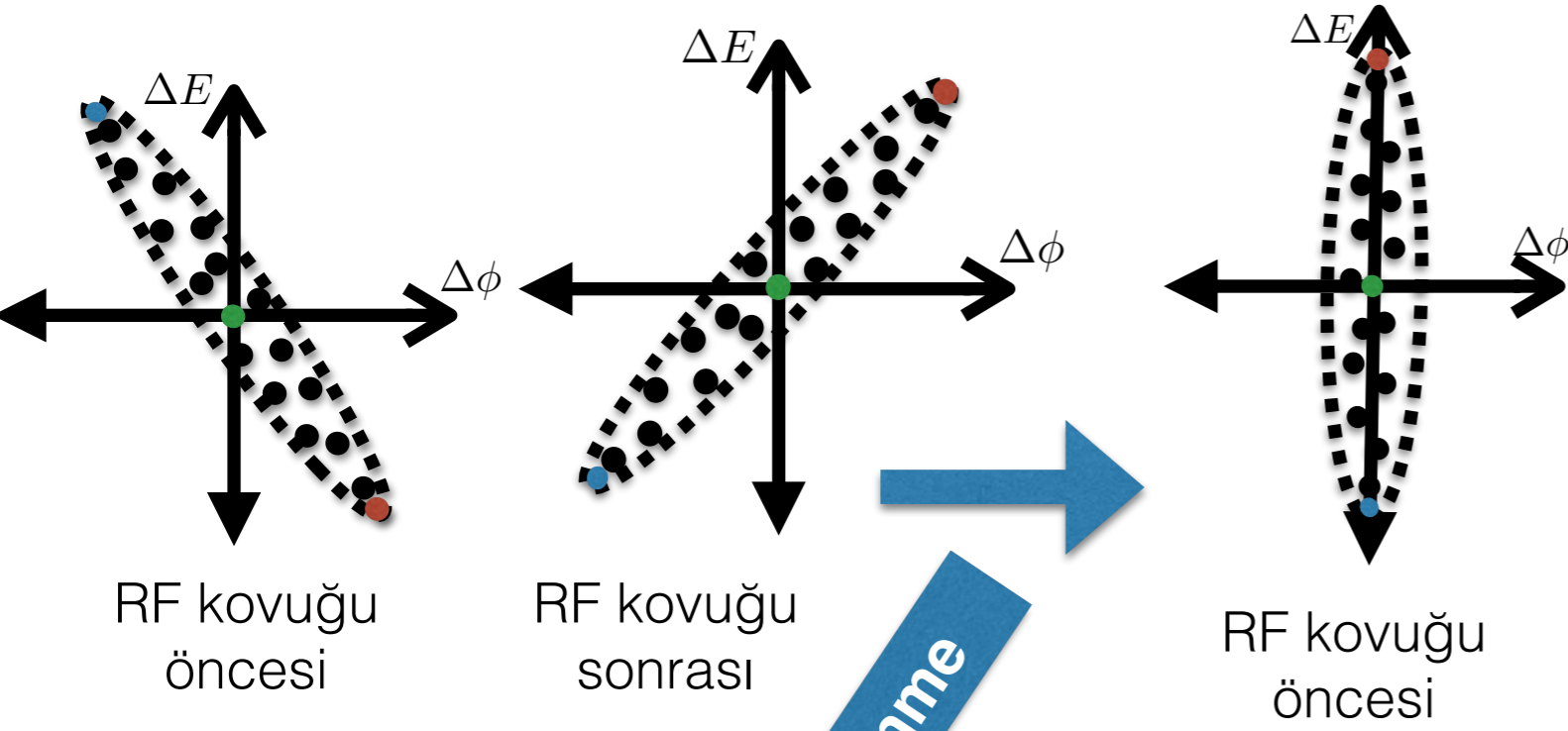
# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)



# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)

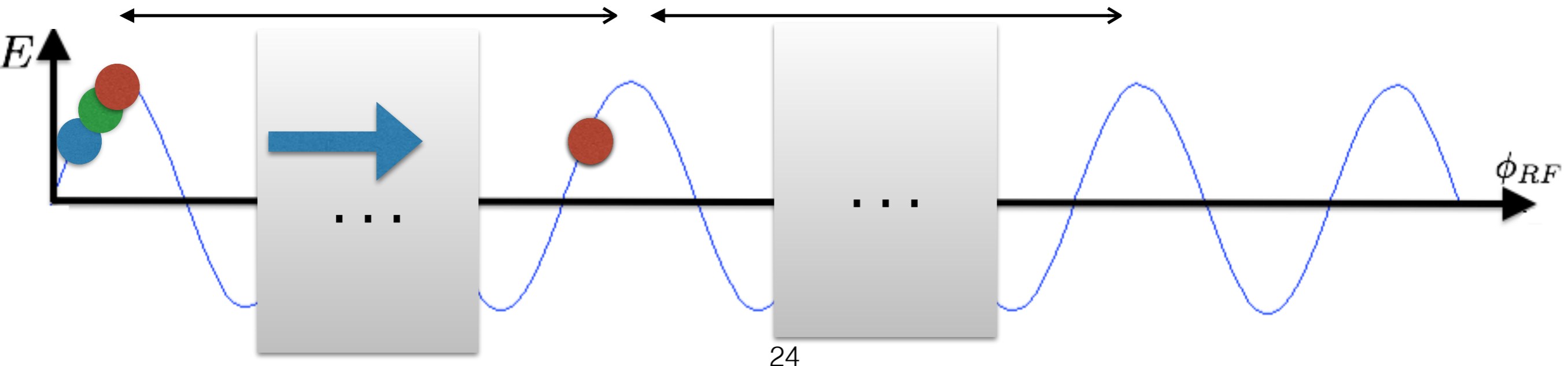


# Boyuna eksende faz uzayı (**eşzamanlayıcı etrafında**)

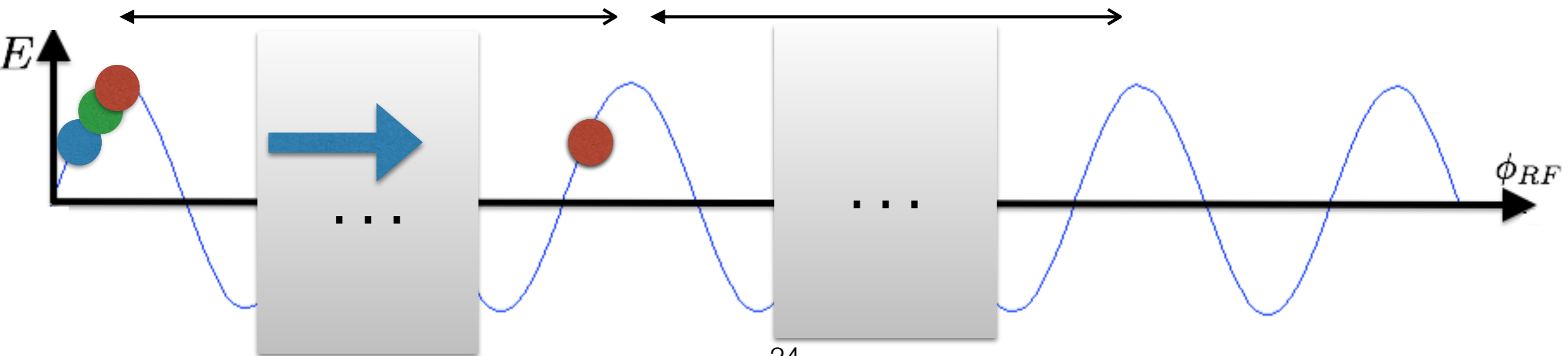
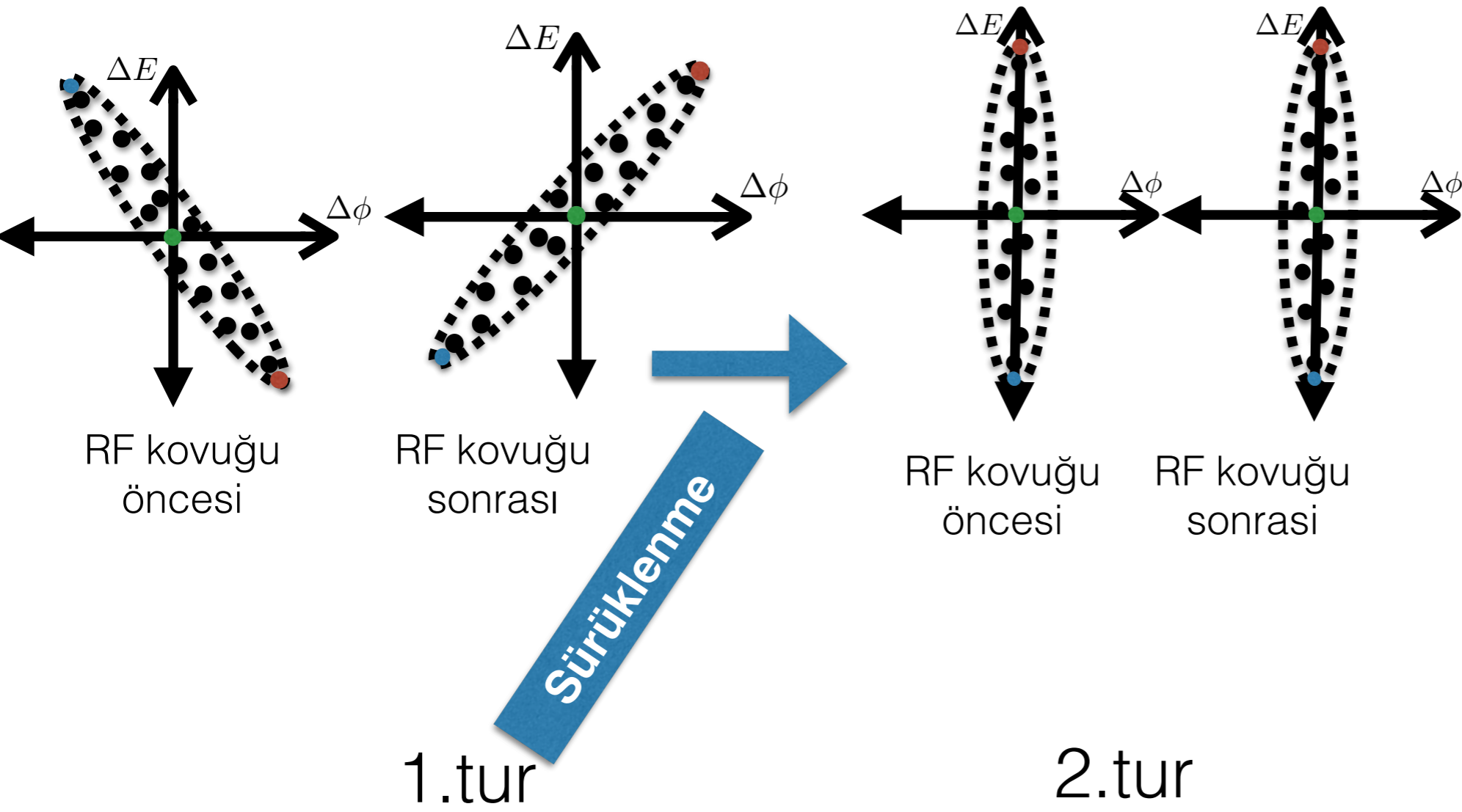


1.tur

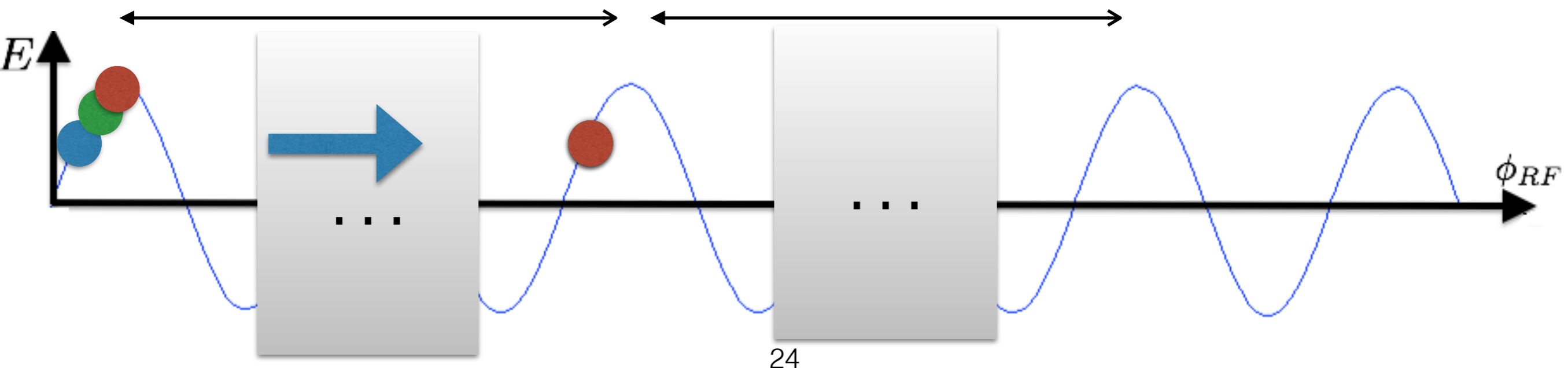
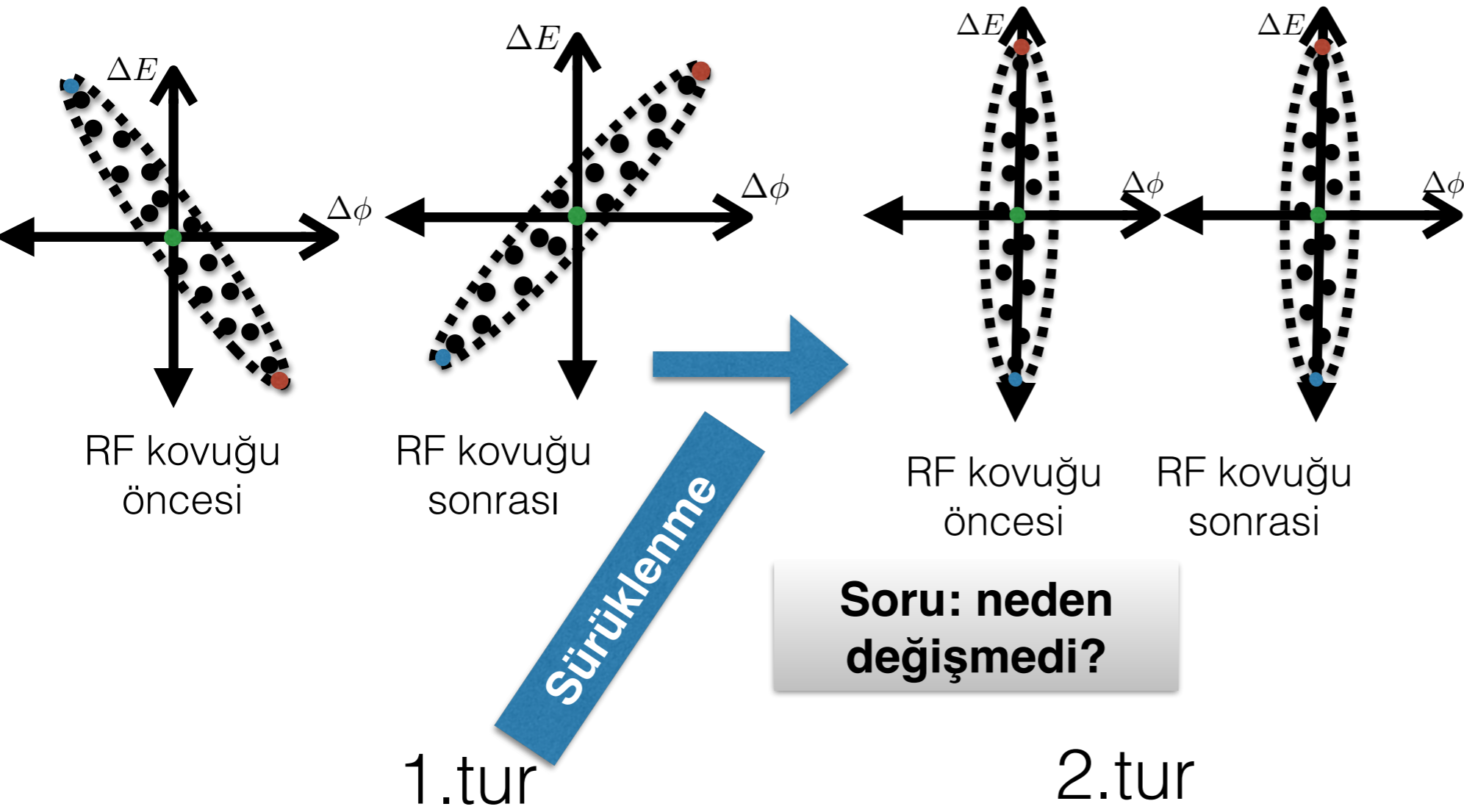
2.tur



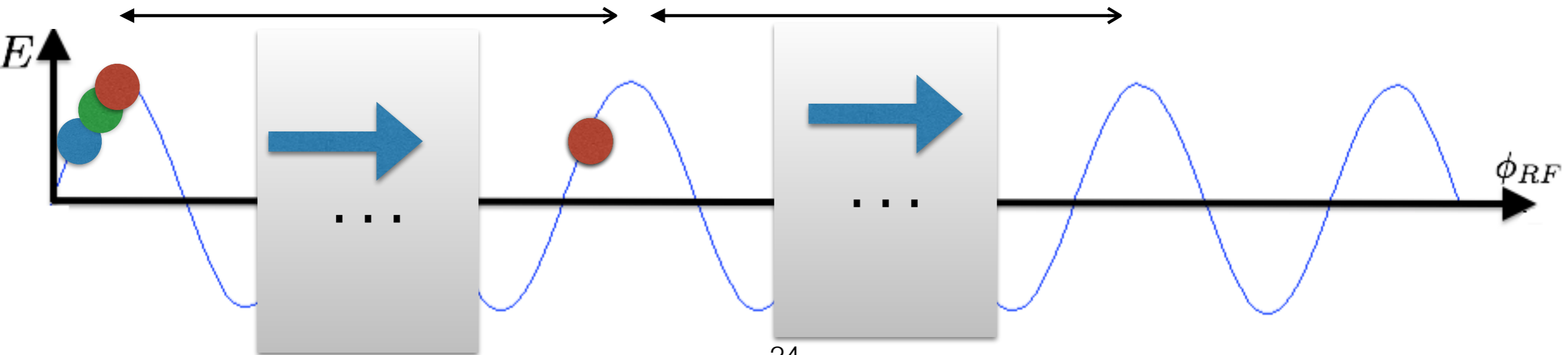
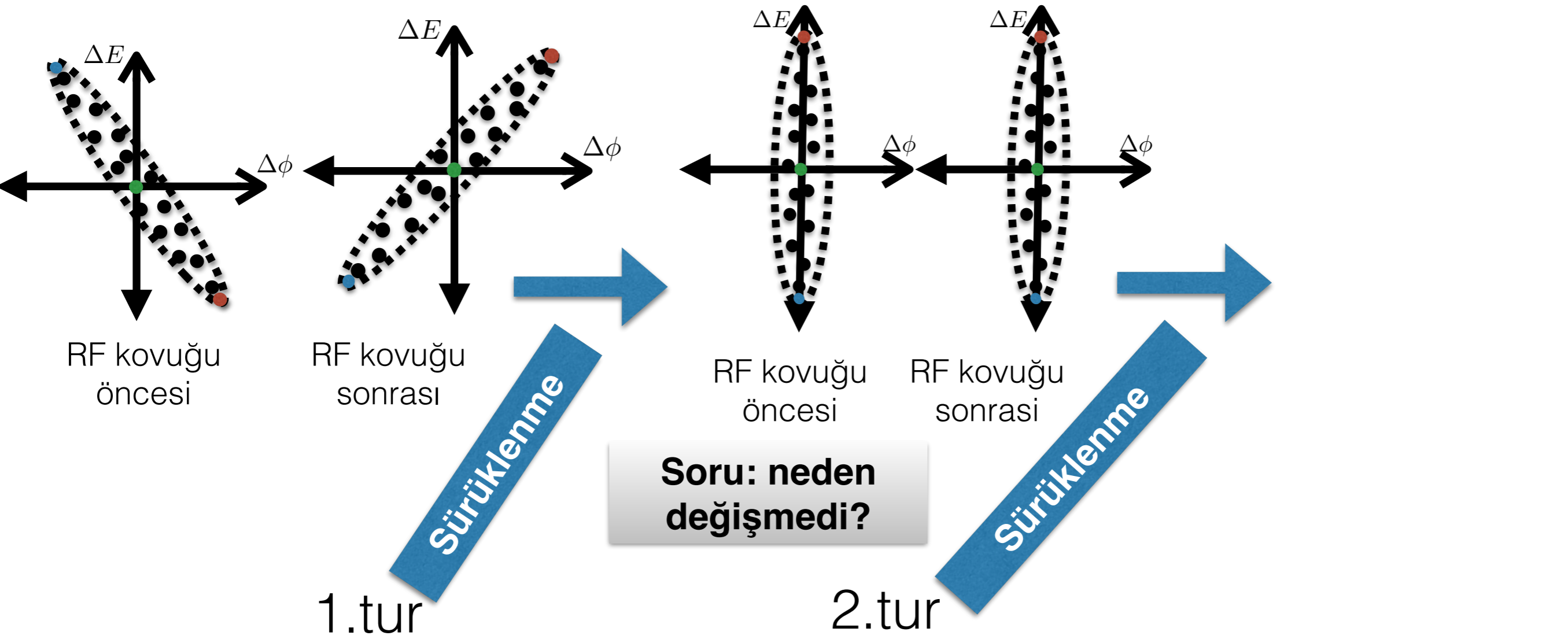
# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)



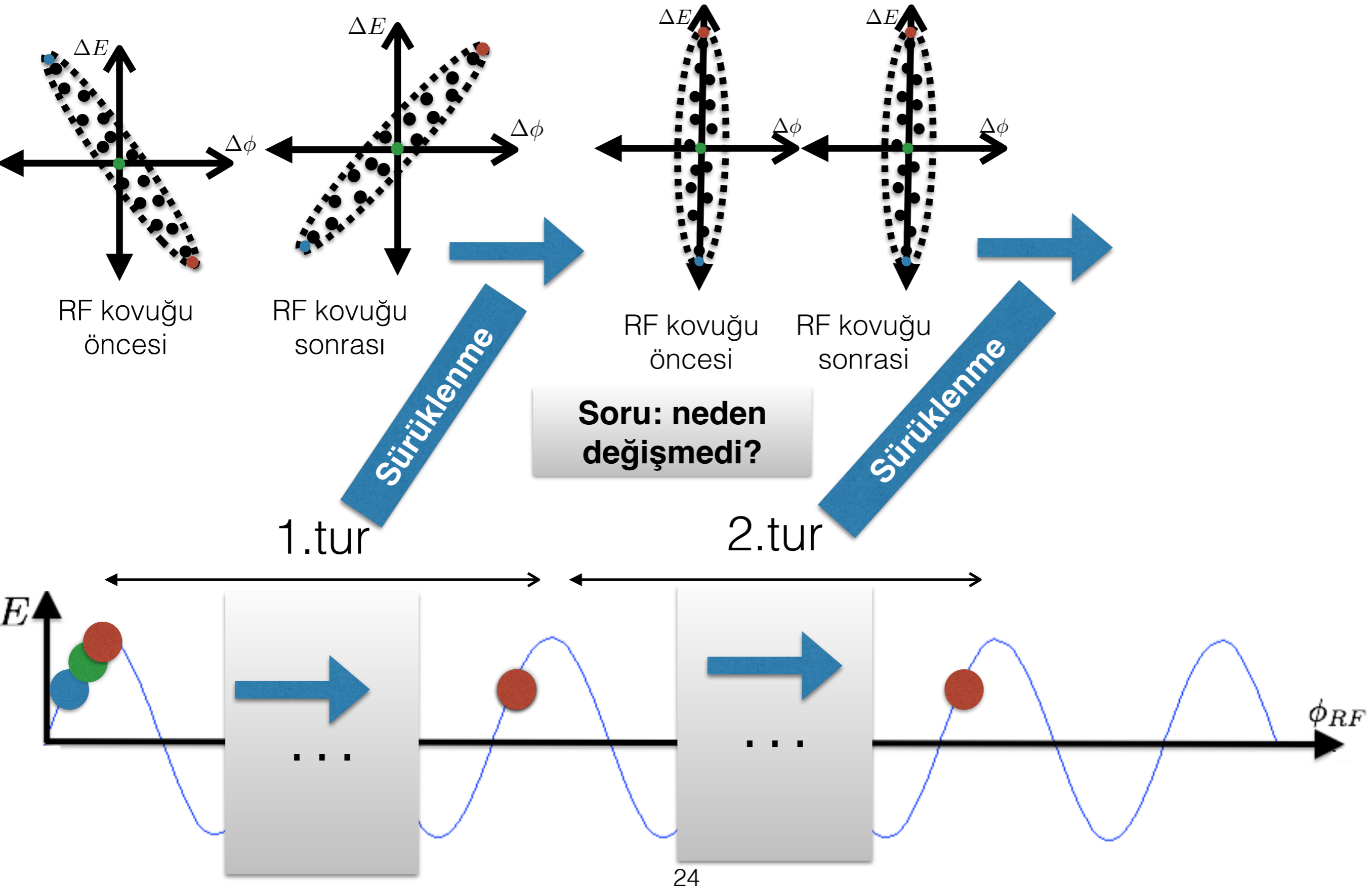
# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)



# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)

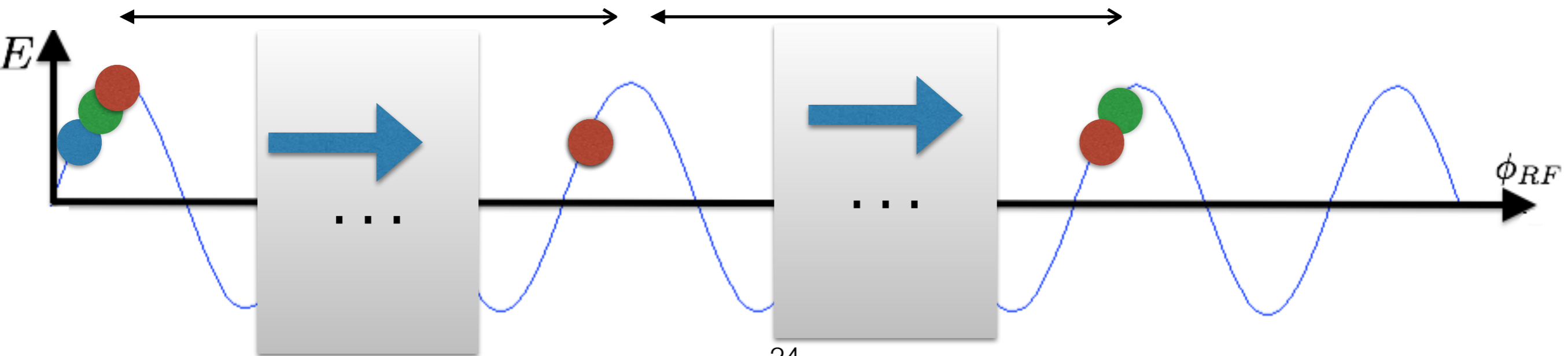
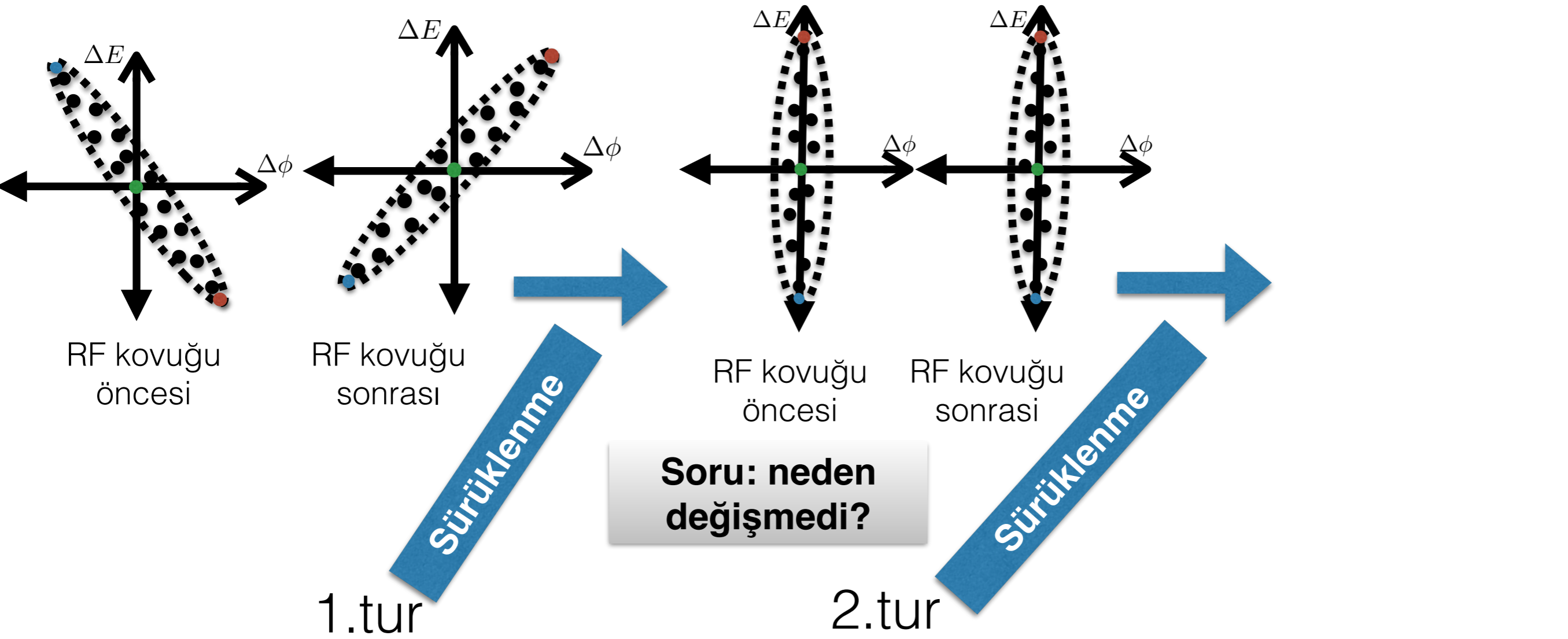


# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)

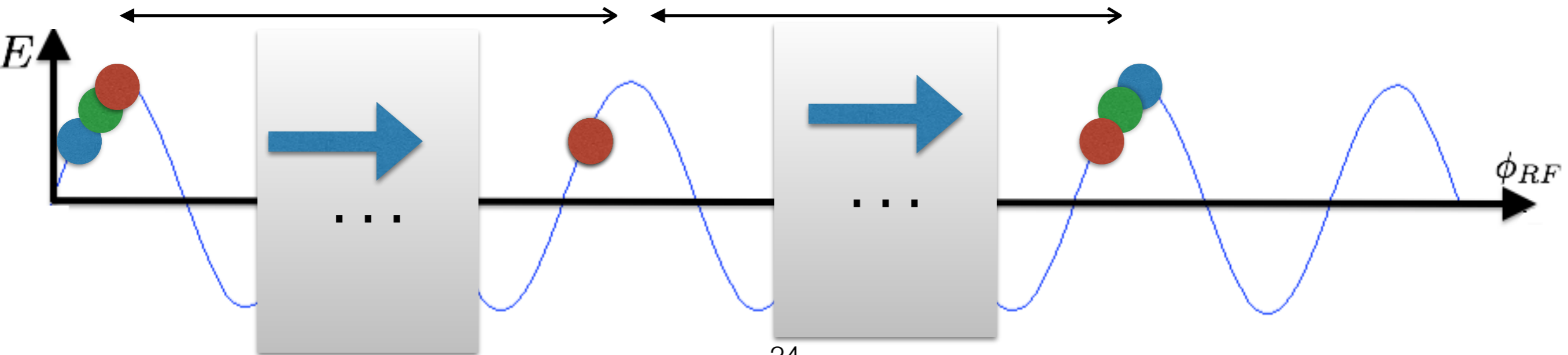
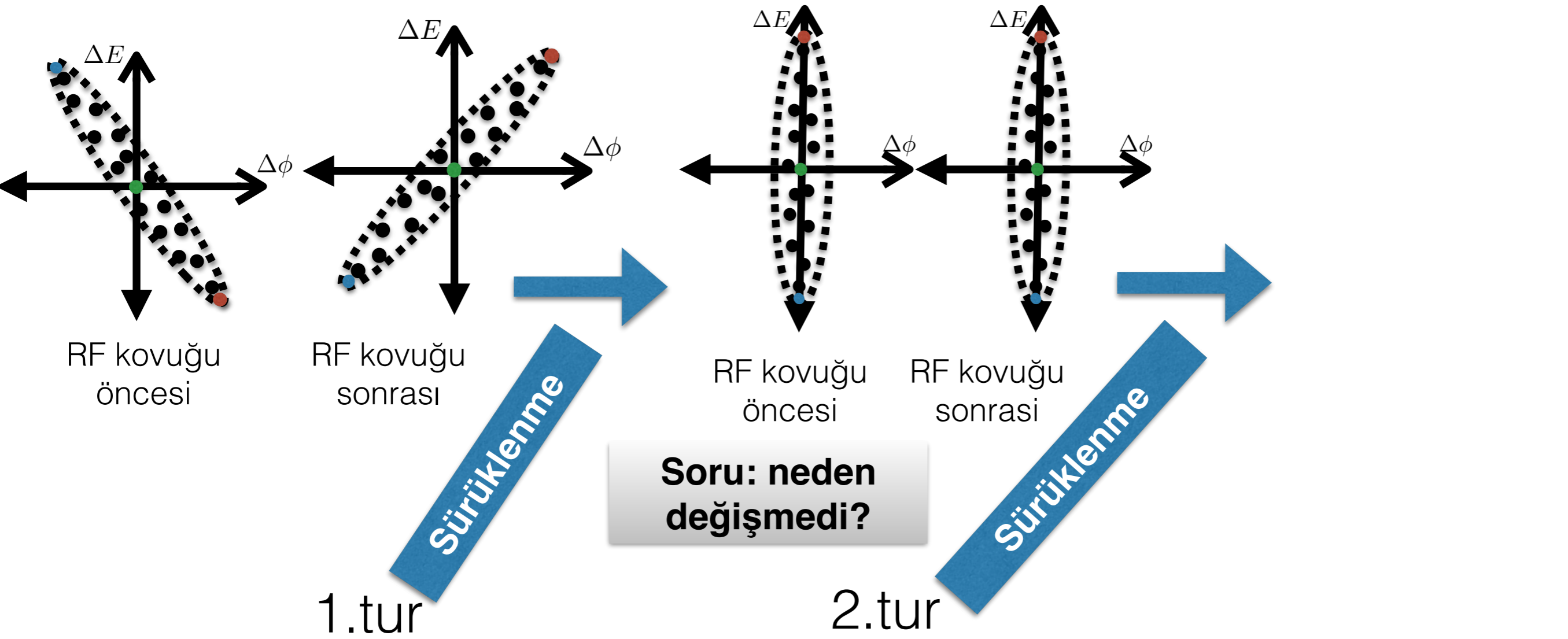




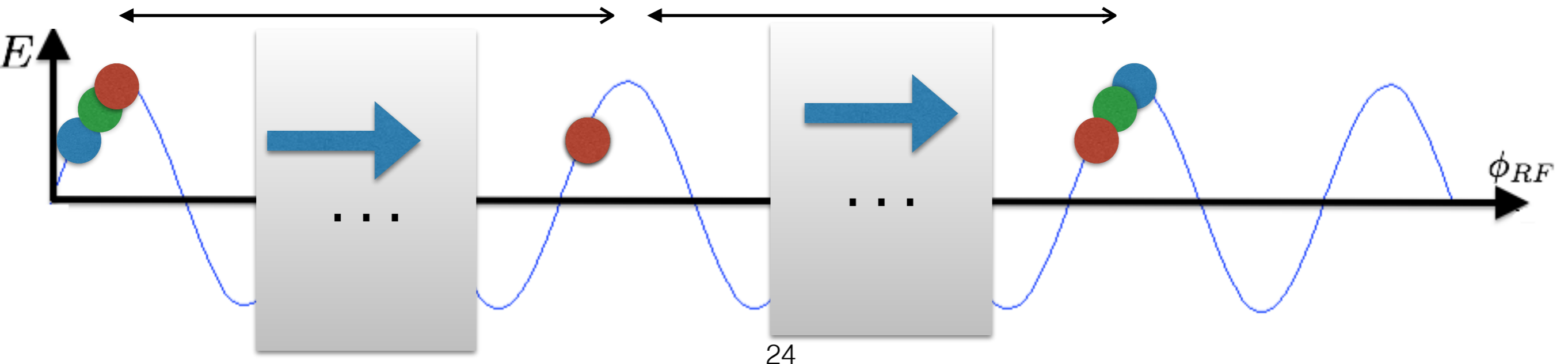
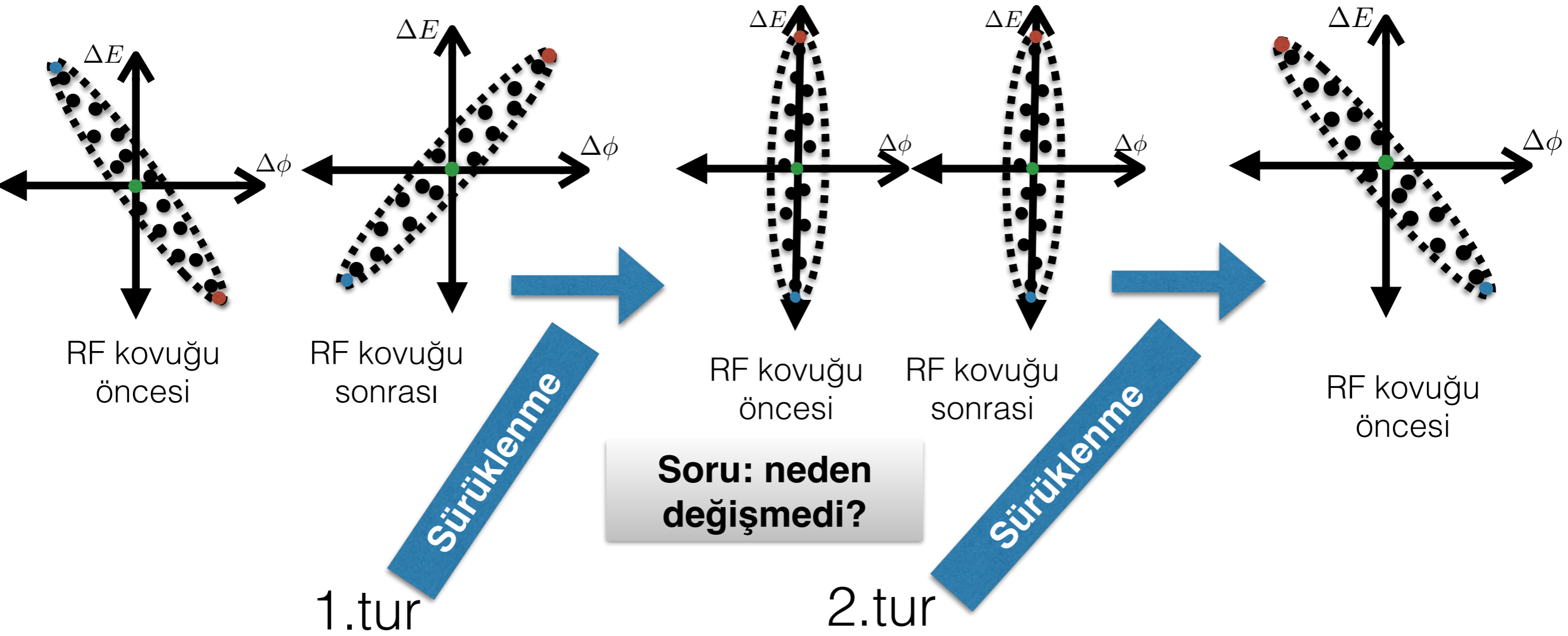
# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)



# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)

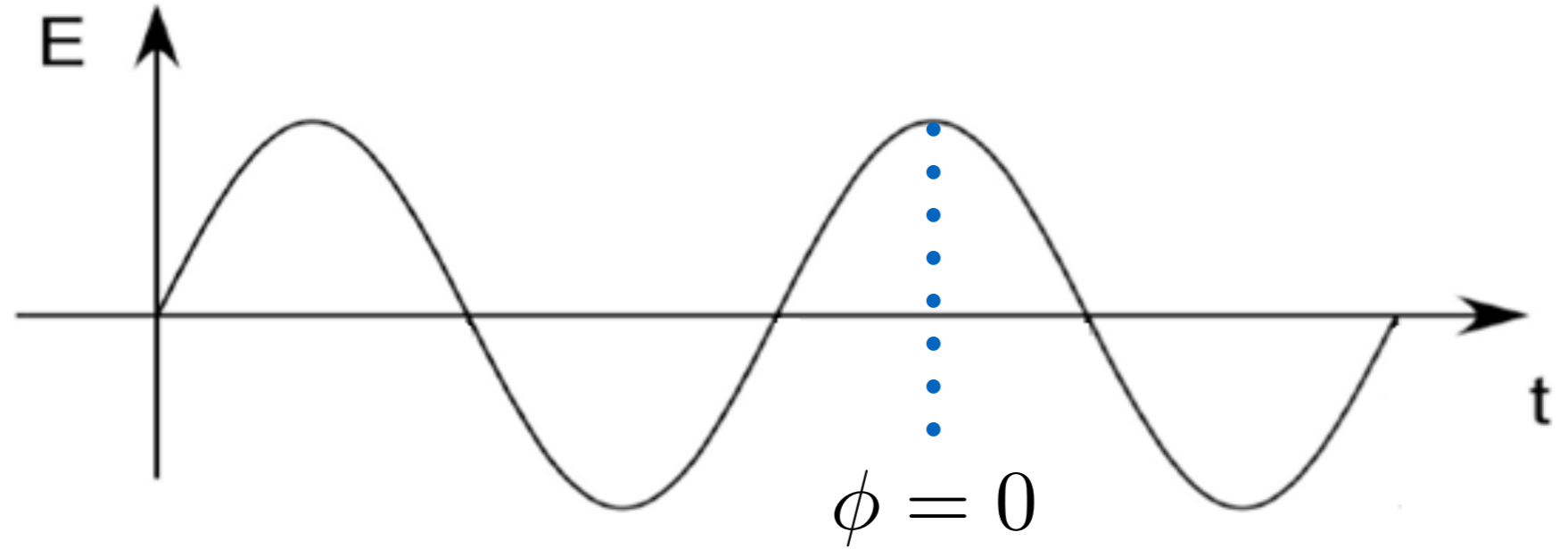


# Boyuna eksende faz uzayı (eşzamanlayıcı etrafında)

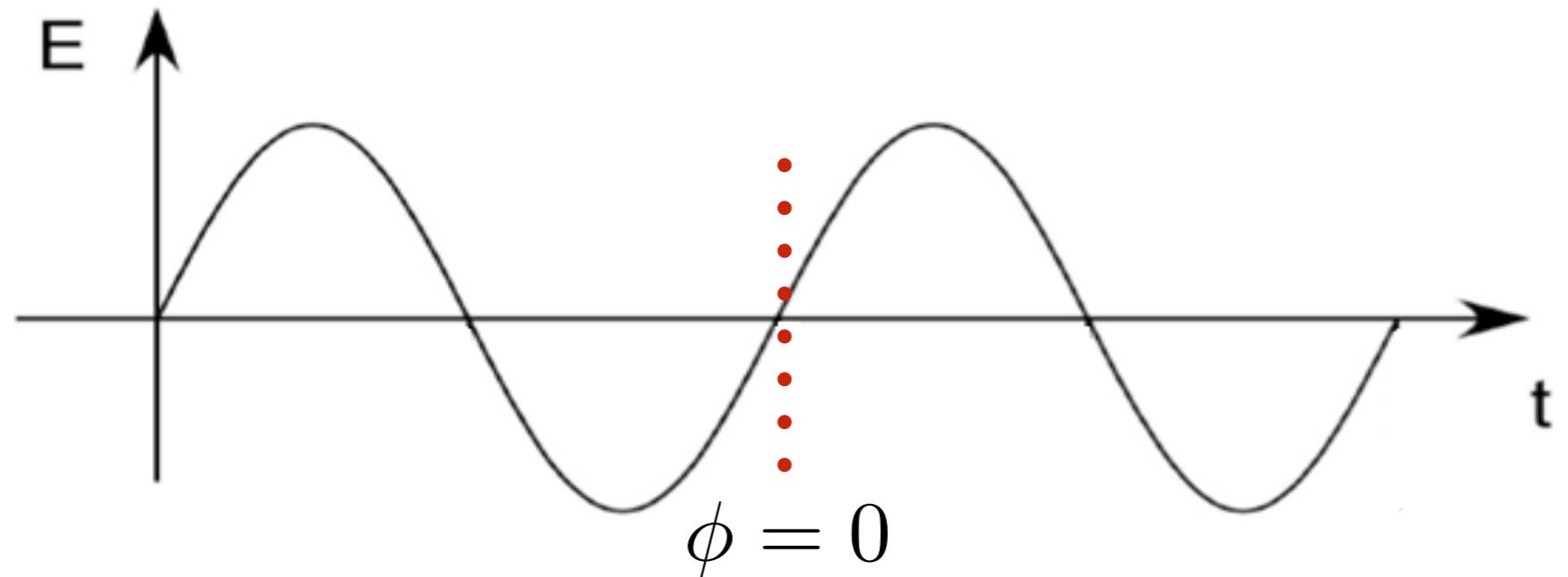


# Doğrusal hızlandırıcı ve Dairesel hızlandırıcı referans noktası arasında fark var!!!

Doğrusal Hızlandırıcı



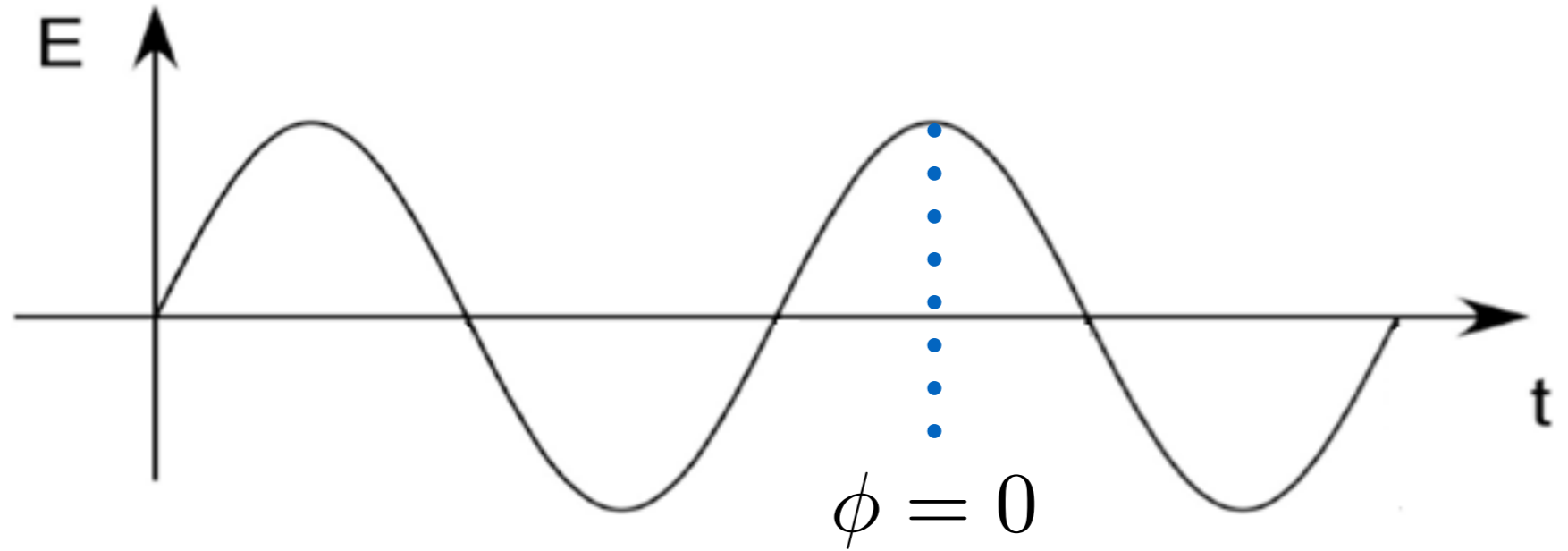
Dairesel Hızlandırıcı



# RF Elektrik Alanında Hızlanma

- Dersin geri kalanında hep doğrusal hızlandırıcıların “0” referansını kullanacağız!!!

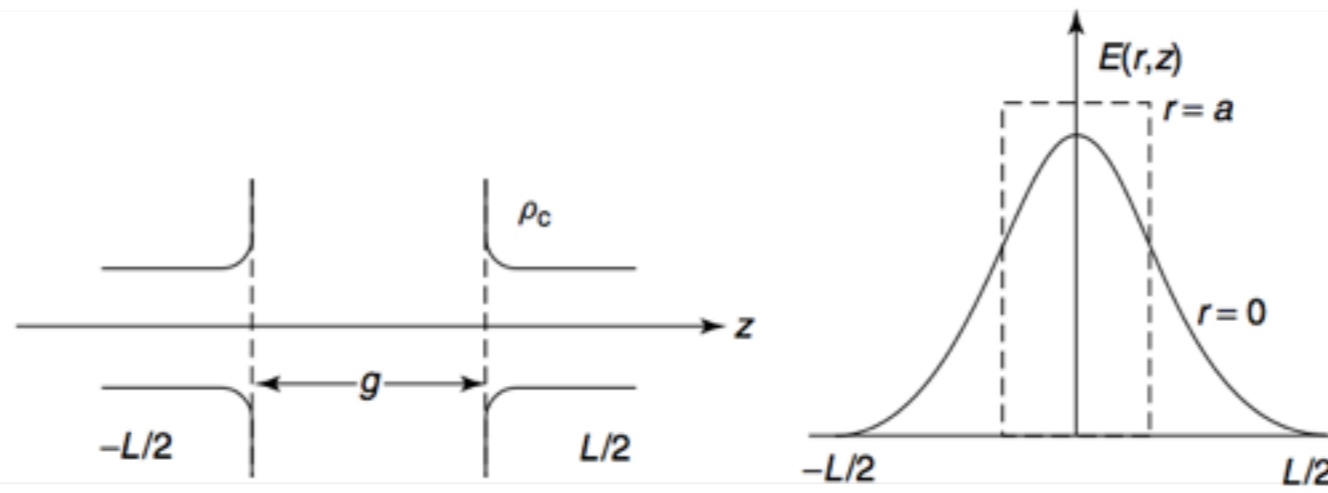
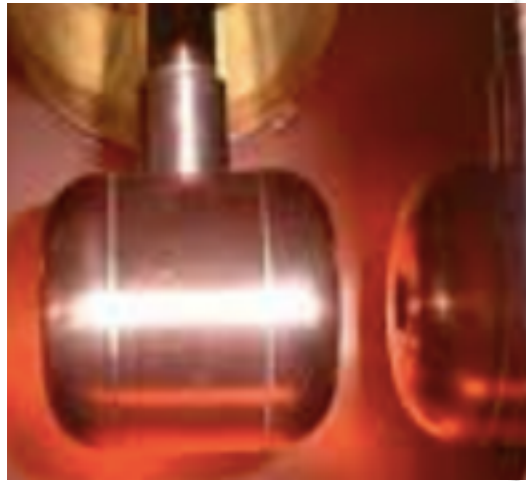
Doğrusal Hızlandırıcı



Hızlandırıcı simetri ekseninde oluşan elektrik alan:

$$E_z(z, t) = E(z) \cos(\omega t + \phi)$$

# RF Elektrik Alanında Hızlanma



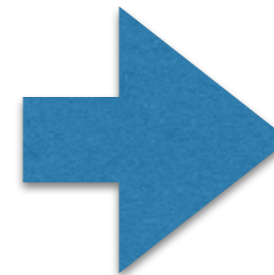
$$\vec{F} = q\vec{E}$$

$$F_z = qE_z$$

$$\Delta W = \int F_z dz$$

$$\Delta W = q \int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) \cos(\omega t(z) + \phi) dz$$

$$\Delta W = q \int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) [\cos \omega t \cos \phi - \sin \omega t \sin \phi] dz$$



$$\Delta W = qV_0 T \cos \phi$$

$$V_0 \equiv \int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) dz$$

$$T \equiv \frac{\int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) \cos \omega t(z) dz}{\int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) dz} - \tan \phi \frac{\int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) \sin \omega t(z) dz}{\int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) dz}$$

# RF Elektrik Alanında Hızlanma

$$V_0 \equiv \int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) dz$$

$$E_0 = V_0/L$$

Bir hücre boyunca eksende oluşan ortalama elektrik alan

Bir hücrede  
kazanılan kinetik  
enerji

$$\Delta W = qE_0 T \cos \phi L$$

# RF Elektrik Alanında Hızlanma

$$V_0 \equiv \int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) dz$$

$$E_0 = V_0/L$$

Bir hücre boyunca eksende oluşan ortalama elektrik alan

Bir hücrede  
kazanılan kinetik  
enerji

$$\Delta W = qE_0 T \cos \phi L$$



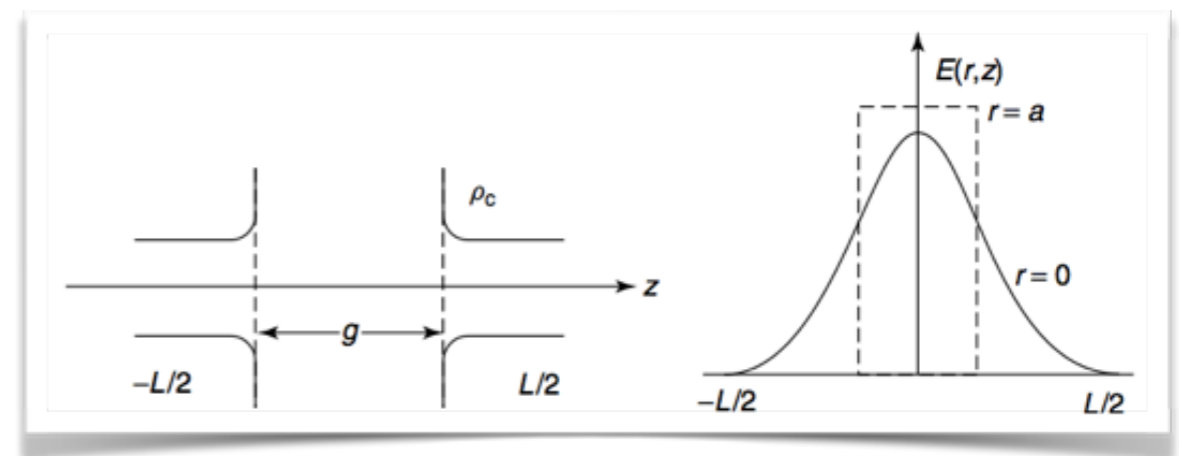
# T (transit time factor)

Değişen alanlar bilgisi T nin içinde!!!

$$T \equiv \frac{\int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) \cos \omega t(z) dz}{\int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) dz} - \tan \phi \frac{\int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) \sin \omega t(z) dz}{\int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) dz}$$

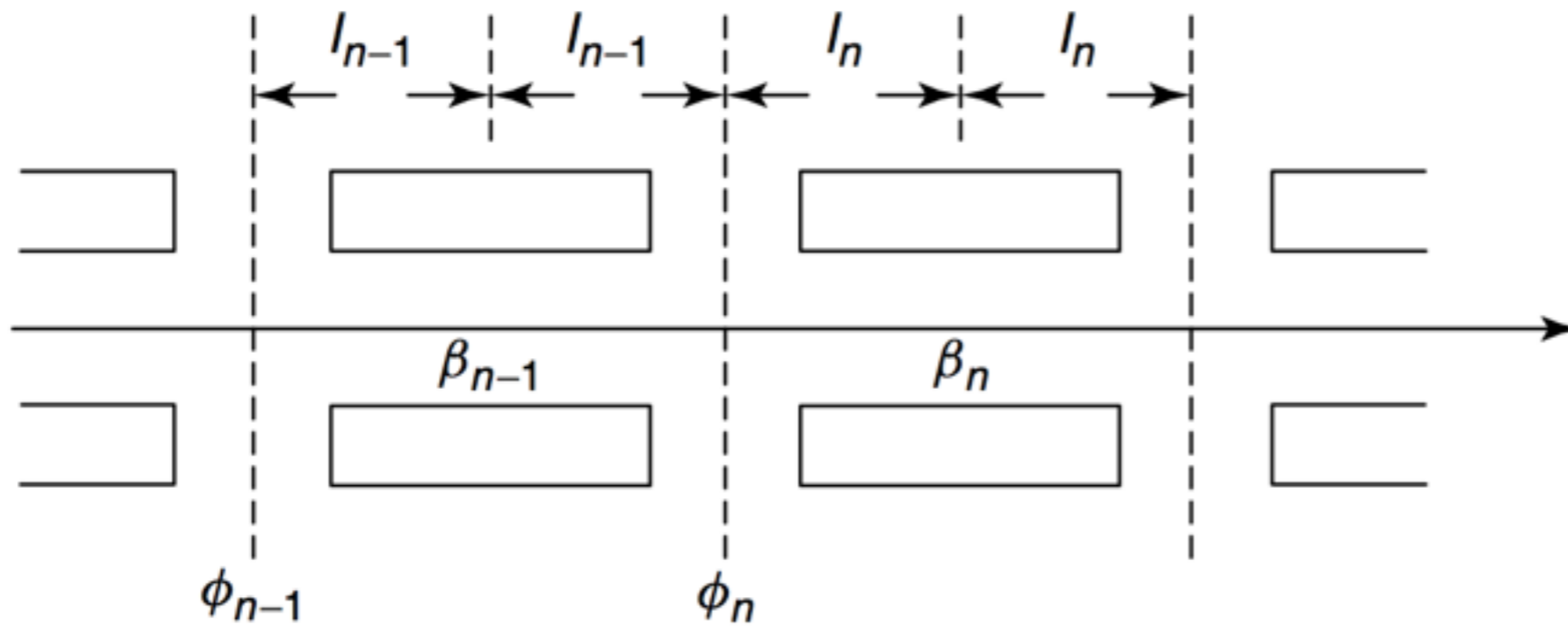
=0 (E simetrik, sin tek fonksiyon)

$$T = \frac{\int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) \cos \omega t(z) dz}{\int_{-L/2}^{L/2} E(0, z) dz}$$



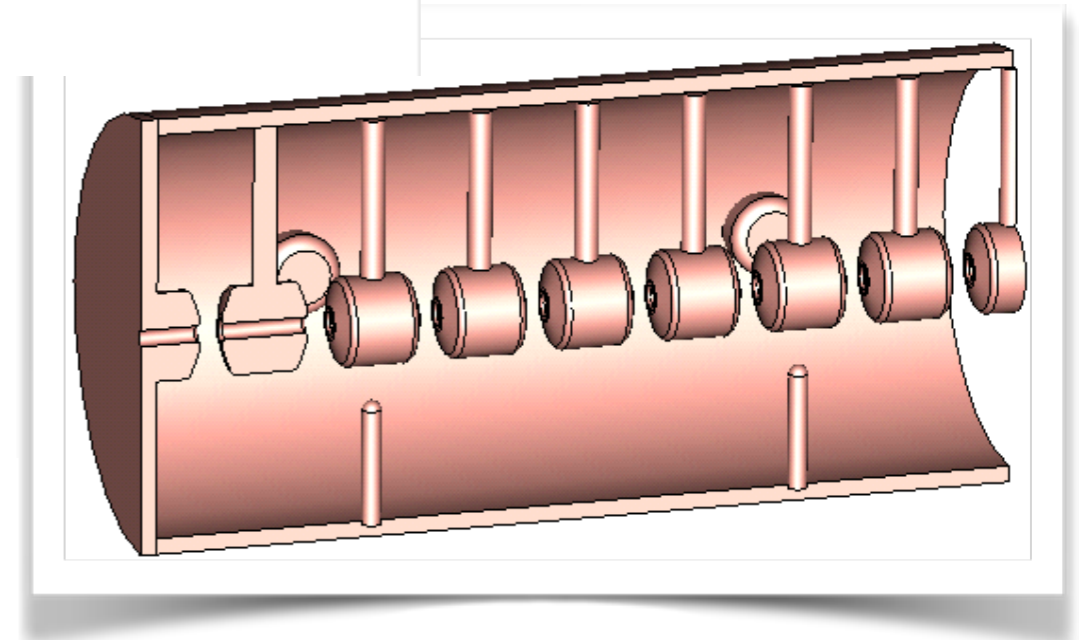
# Boyuna ekseninde hareket deneklemi

- Denklemi çıkartırken hareketi sürüklenme-hızlanma-sürüklenme kabul edeceğiz.

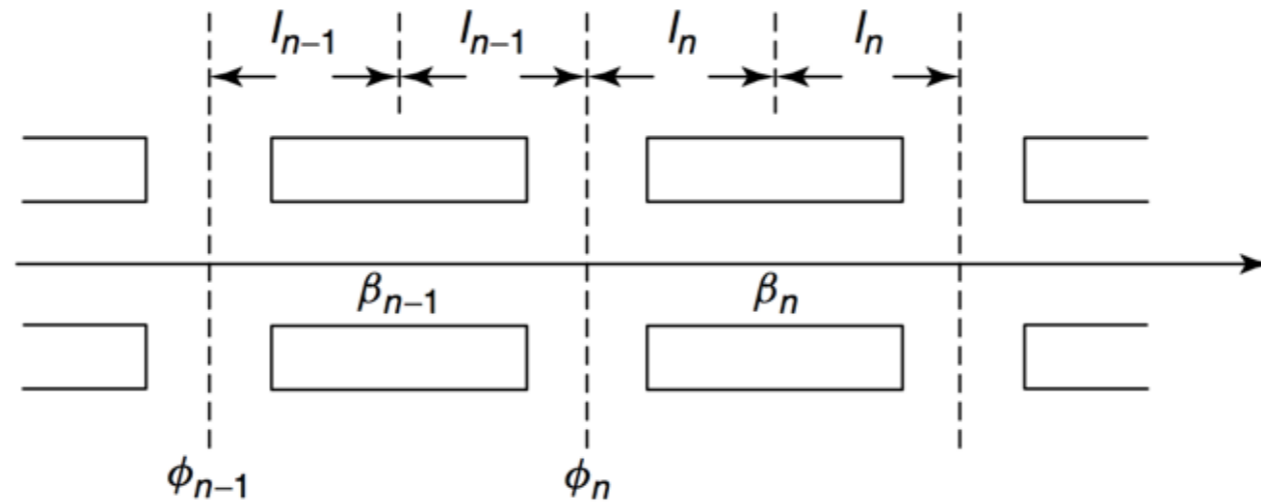


$$\phi_n = \phi_{n-1} + \omega \frac{2l_{n-1}}{\beta_{n-1}c} + \begin{cases} \pi & \text{for } \pi \text{ mode} \\ 0 & \text{for } 0 \text{ mode} \end{cases}$$

$$l_{n-1} = N\beta_{s,n-1}\lambda/2, \quad \text{where } N = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{for } \pi \text{ mode} \\ 1 & \text{for } 0 \text{ mode} \end{cases}$$



# Boyuna ekseninde hareket deneklemi



n-1 den n hızlanma boşluğuna kadar herhangi bir parçacığın faz değişimi ile eşzamanlı parçacığın faz değişimi arasındaki fark:

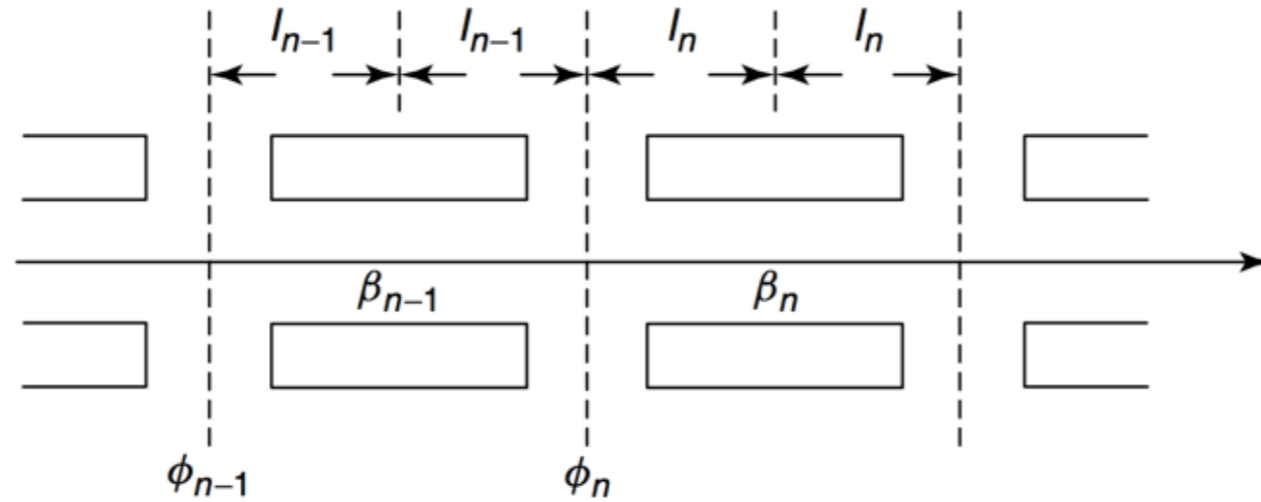
$$\Delta(\phi - \phi_s)_n = \Delta\phi_n - \Delta\phi_{s,n} = 2\pi N\beta_{s,n-1} \left[ \frac{1}{\beta_{n-1}} - \frac{1}{\beta_{s,n-1}} \right]$$

Taylor açılımı

$$\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\beta_s} = \frac{1}{\beta_s + \delta\beta} - \frac{1}{\beta_s} \approx -\frac{\delta\beta}{\beta_s^2}, \quad \text{for } \delta\beta \ll 1$$

$$\delta\beta = \delta W / mc^2 \gamma_s^3 \beta_s$$

# Boyuna ekseninde hareket deneklemi



Bir önceki sayfada bulunan eşitliklerli kullanırsak faz için fark deneklemi şöyle çıkıyor:

$$\Delta(\phi - \phi_s)_n = -2\pi N \frac{(W_{n-1} - W_{s,n-1})}{mc^2 \gamma_{s,n-1}^3 \beta_{s,n-1}^2}$$

Enerji için fark deneklemi (herhangi bir parçacıkla eşzamanlı parçacığın kazandığı enerjilerin farkı)

$$\Delta(W - W_s)_n = \Delta W_n - \Delta W_{s,n} = qE_0 T L_n (\cos \varphi_n - \cos \varphi_{s,n})$$

# Boyuna ekseninde hareke için diferansiyel deneklem

$$\Delta(\phi - \phi_s) \rightarrow \frac{d(\phi - \phi_s)}{dn}$$

$$\Delta(W - W_s) \rightarrow \frac{d(W - W_s)}{dn}$$

n hızlanma boşluğunun numrası. Denklemi n den boyuna eksen için kullanılan parametre ile (s) değıştirelim.

$$n = s / (N\beta_s\lambda) \quad \text{hücre numrası} = \text{uzunluk} / \text{hücre boyu}$$

**Böylece bir öncedeki fark denklemleri diferansiyel deneklemlere dönüştü**

$$\gamma_s^3 \beta_s^3 \frac{d(\phi - \phi_s)}{ds} = -2\pi \frac{(W - W_s)}{mc^2\lambda}$$

$$\frac{d(W - W_s)}{ds} = qE_0 T(\cos \phi - \cos \phi_s)$$

# Boyuna ekseninde hareke için diferansiyel deneklem

$$\gamma_s^3 \beta_s^3 \frac{d(\phi - \phi_s)}{ds} = -2\pi \frac{(W - W_s)}{mc^2 \lambda}$$

bu denklemin türevini alıp  
birsonraki denkleme koy

$$\frac{d(W - W_s)}{ds} = qE_0 T (\cos \phi - \cos \phi_s)$$

$$\frac{d}{ds} \left[ \gamma_s^3 \beta_s^3 \frac{d(\phi - \phi_s)}{ds} \right] = -2\pi \frac{qE_0 T}{mc^2 \lambda} (\cos \phi - \cos \phi_s)$$

$$w \equiv \delta\gamma = \frac{W - W_s}{mc^2}, \quad A \equiv \frac{2\pi}{\beta_s^3 \gamma_s^3 \lambda}, \quad \text{and} \quad B \equiv \frac{qE_0 T}{mc^2}$$

şu eşitlikleri kullanark üstteki  
denklemleri aşağıdaki gibi  
basitleştirelim

$$w' \equiv dw/ds = B(\cos \phi - \cos \phi_s)$$

$$\phi' \equiv d\phi/ds = -Aw$$

$$\phi'' \equiv d^2\phi/ds^2 = -AB(\cos \phi - \cos \phi_s)$$

Boyuna ekseninde hareke için diferansiyel deneklem

$$\phi'' \equiv d^2\phi/ds^2 = -AB(\cos\phi - \cos\phi_s)$$

bu denklemin integralini al

$$d\phi' = -AB(\cos\phi - \cos\phi_s)ds$$

yukarıdaki denklemini

$\phi'$

ile çarpıp

$$ds = d\phi/\phi' \text{ eşitliğini kullanıp integralini al ve}$$

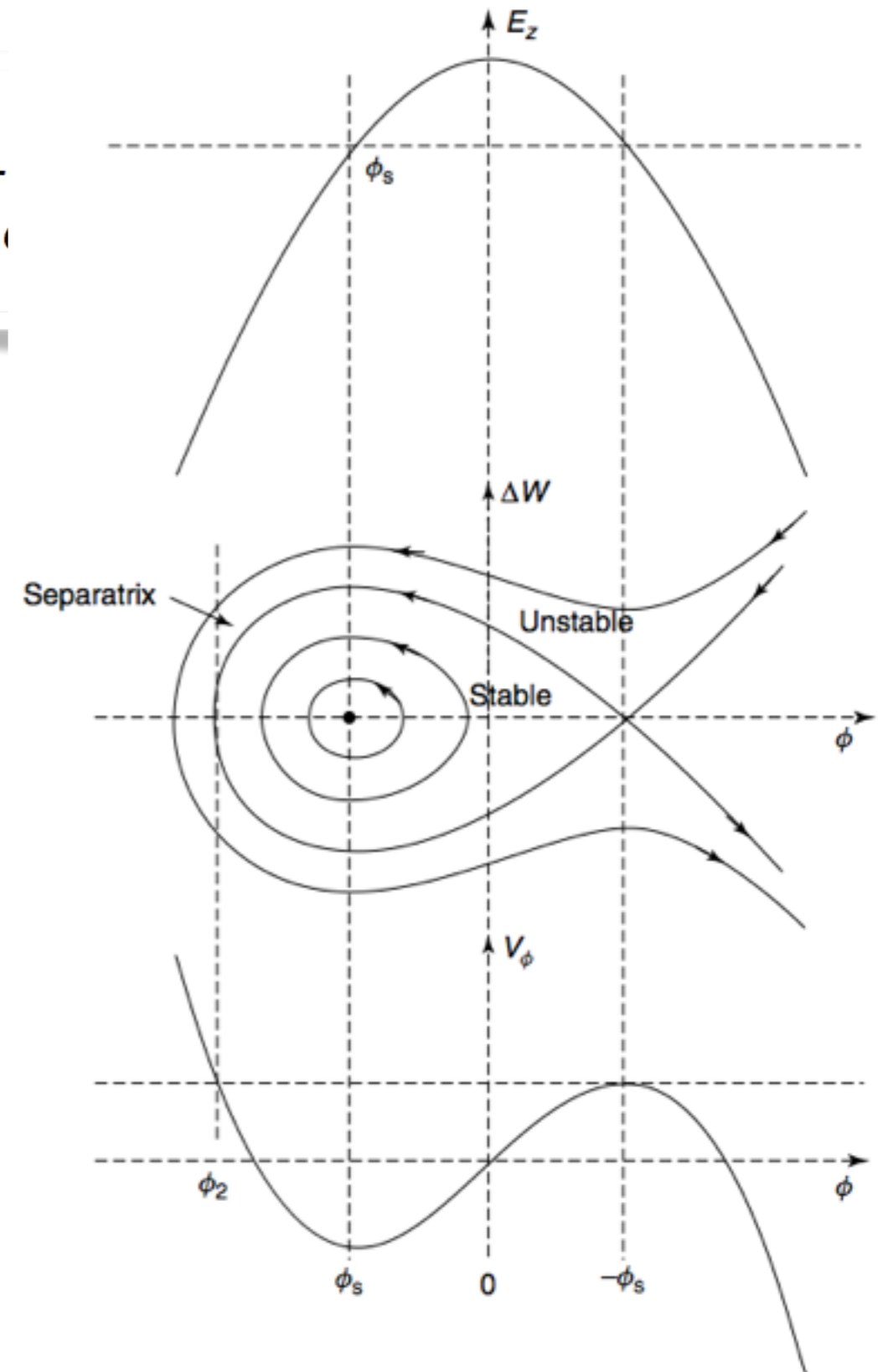
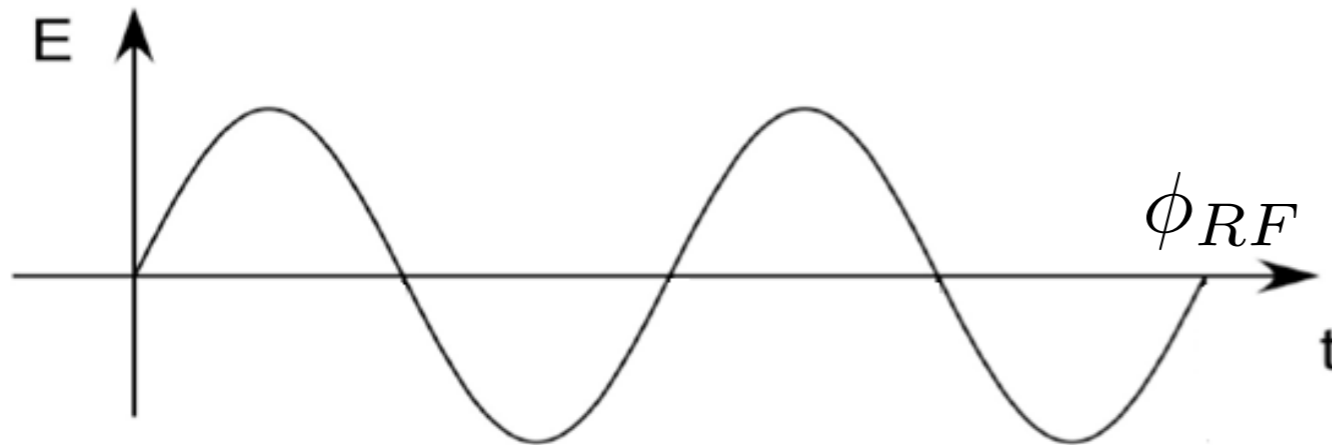
$$\phi' \equiv d\phi/ds = -Aw \text{ denklemini sonuca koy}$$

$$\frac{Aw^2}{2} + B(\sin\phi - \phi \cos\phi_s) = H_\phi$$

$$A \equiv \frac{2\pi}{\beta_s^3 \gamma_s^3 \lambda}, \text{ and } B \equiv \frac{qE_0 T}{mc^2}$$

$$\frac{A\omega^2}{2} + B(\sin \phi - \phi \cos \phi_s) = H,$$

İlk terim kinetik enerji terimi  
ikinci terim potansiyel terimi  
denklemin sağ tarafı Hamilton

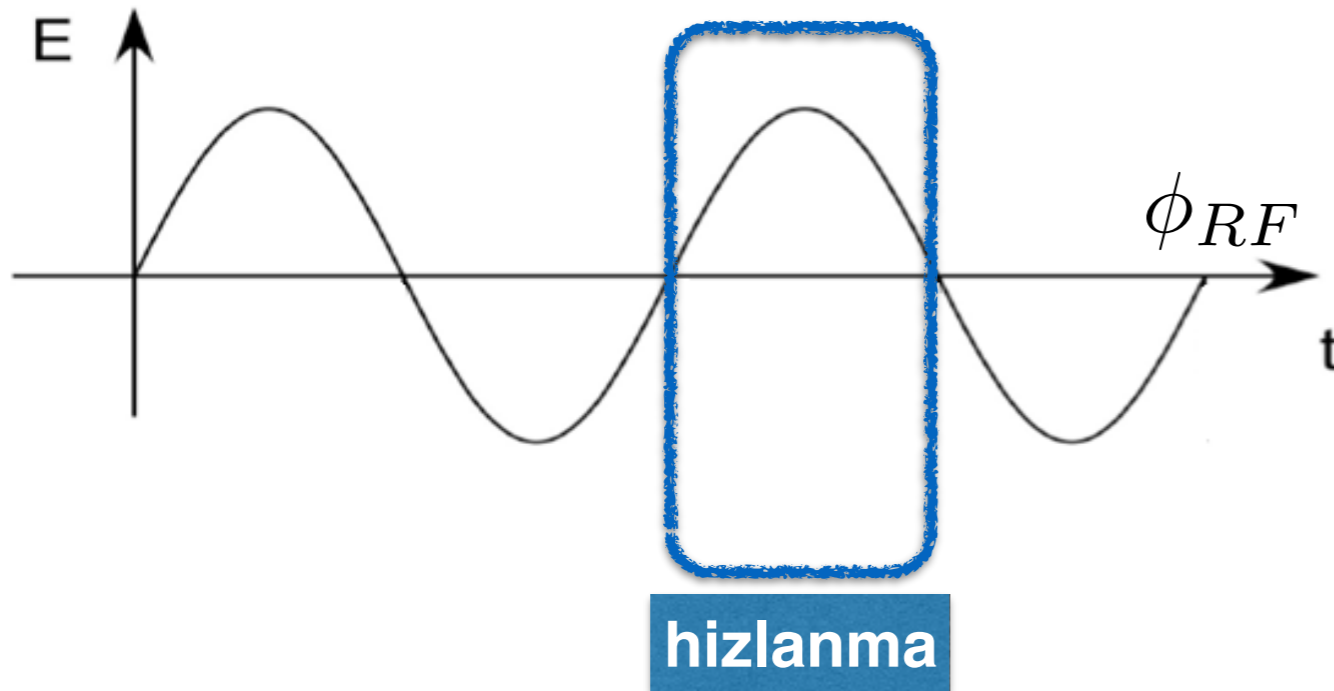




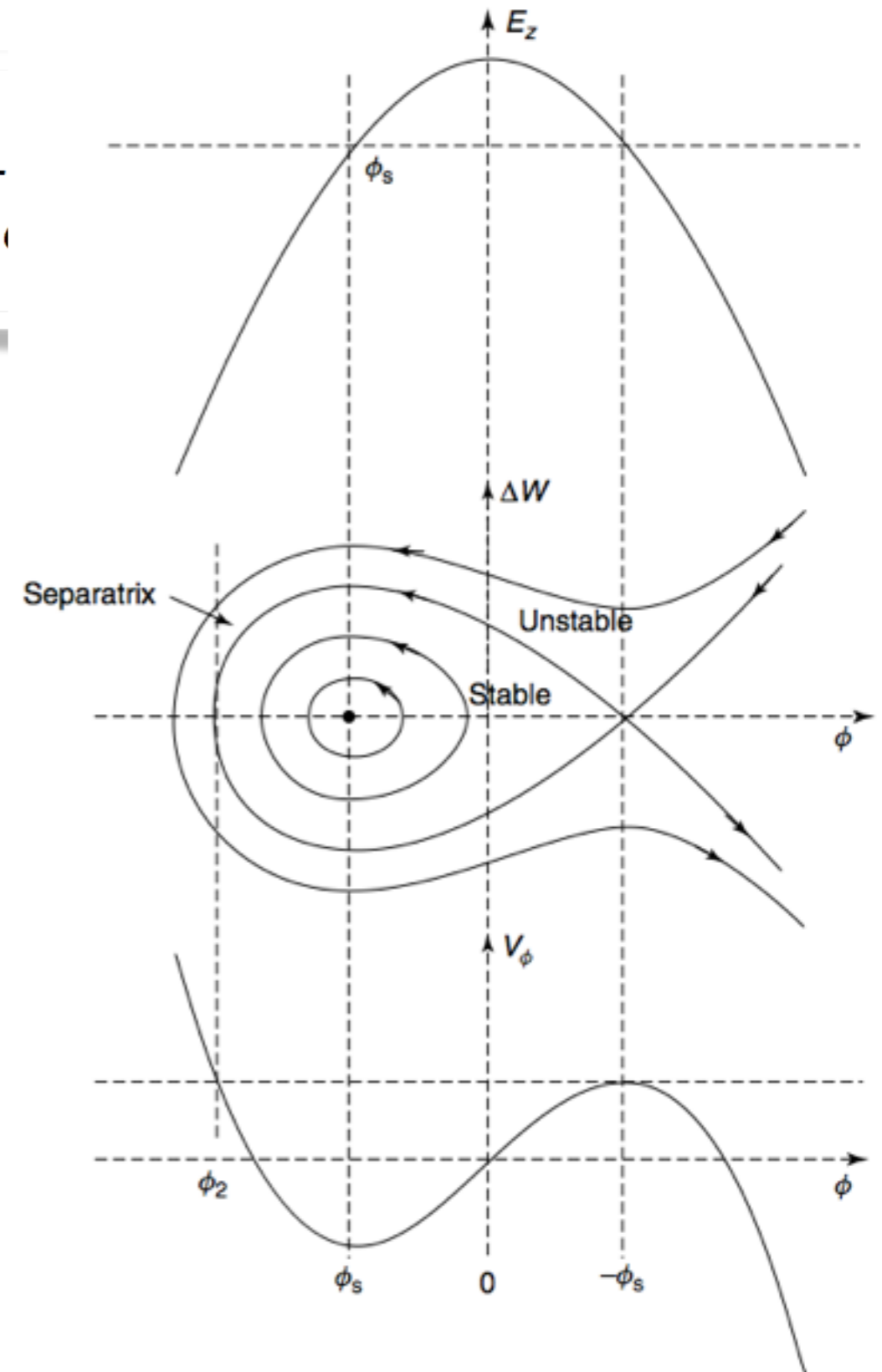
$$A \equiv \frac{2\pi}{\beta_s^3 \gamma_s^3 \lambda}, \text{ and } B \equiv \frac{qE_0 T}{mc^2}$$

$$\frac{A\omega^2}{2} + B(\sin \phi - \phi \cos \phi_s) = H,$$

İlk terim kinetik enerji terimi  
ikinci terim potansiyel terimi  
denklemin sağ tarafı Hamilton



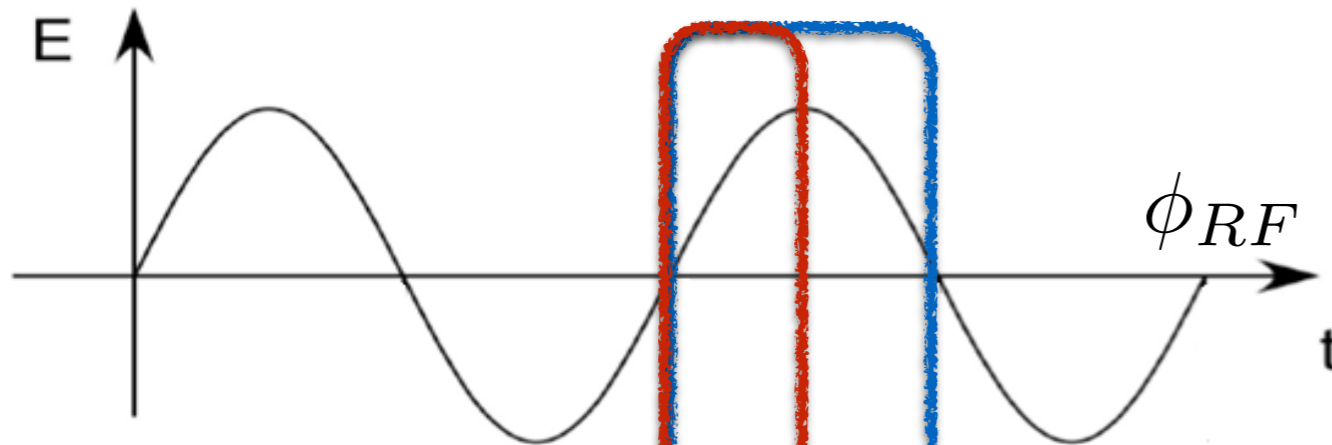
$$-\pi/2 \leq \phi_s \leq \pi/2$$



$$A \equiv \frac{2\pi}{\beta_s^3 \gamma_s^3 \lambda}, \text{ and } B \equiv \frac{qE_0 T}{mc^2}$$

$$\frac{A\omega^2}{2} + B(\sin \phi - \phi \cos \phi_s) = H,$$

İlk terim kinetik enerji terimi  
ikinci terim potansiyel terimi  
denklemin sağ tarafı Hamilton

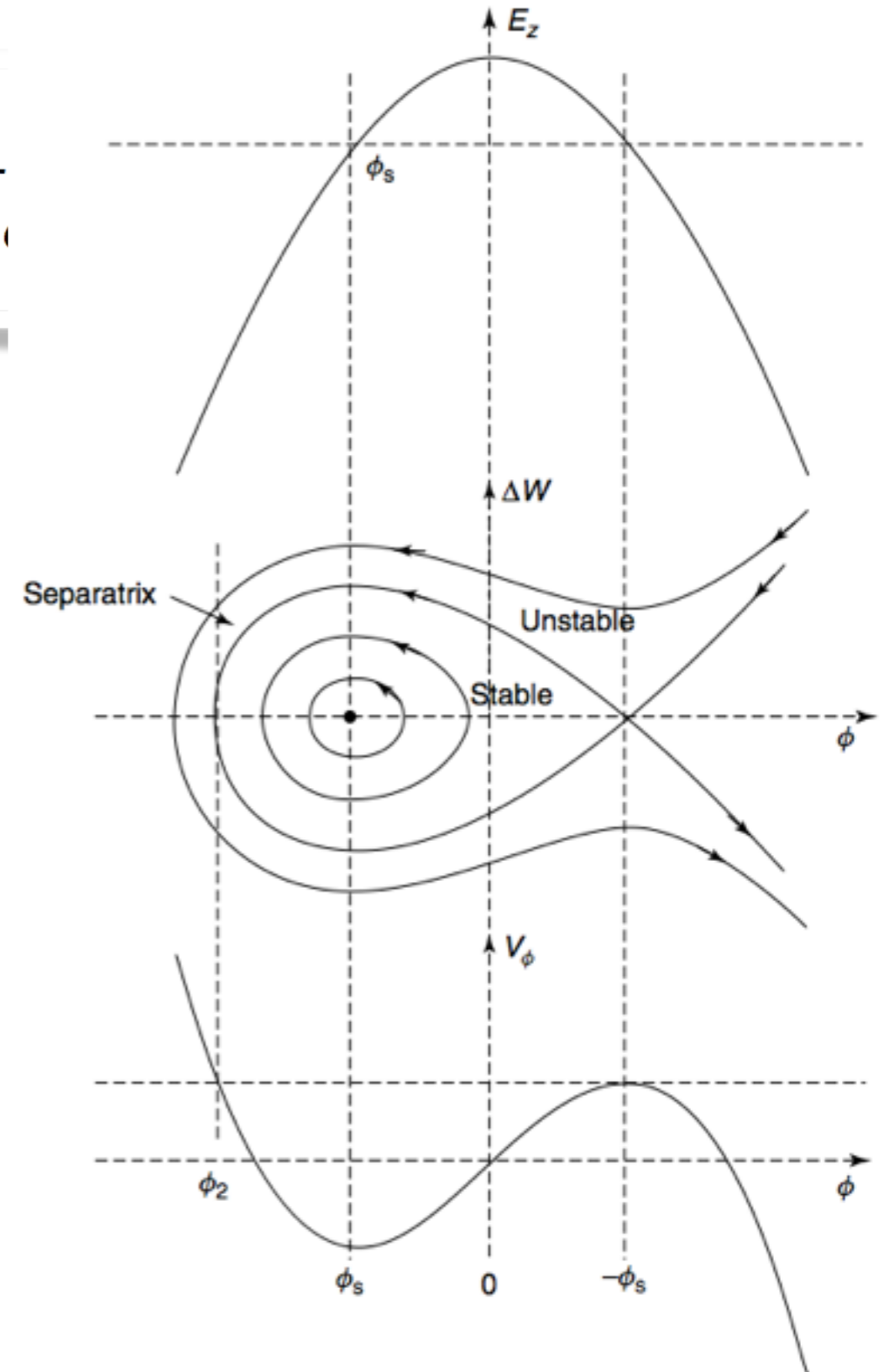


hızlanma  
ve potansiyel  
çukuru

hızlanma

$$-\pi/2 \leq \phi_s \leq \pi/2$$

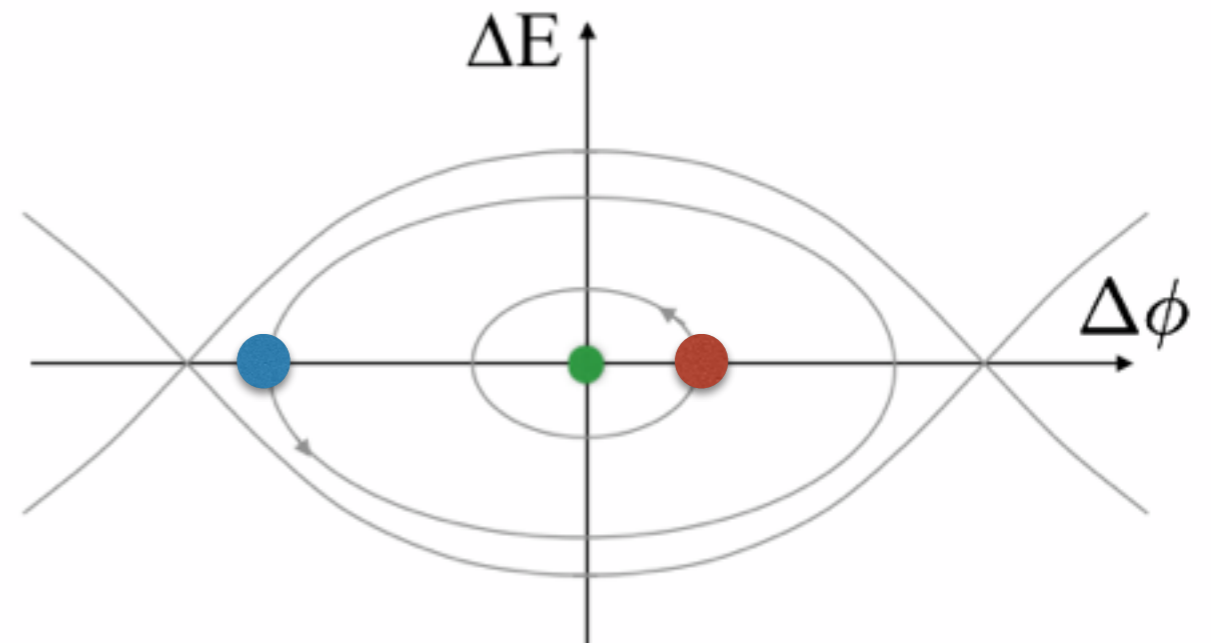
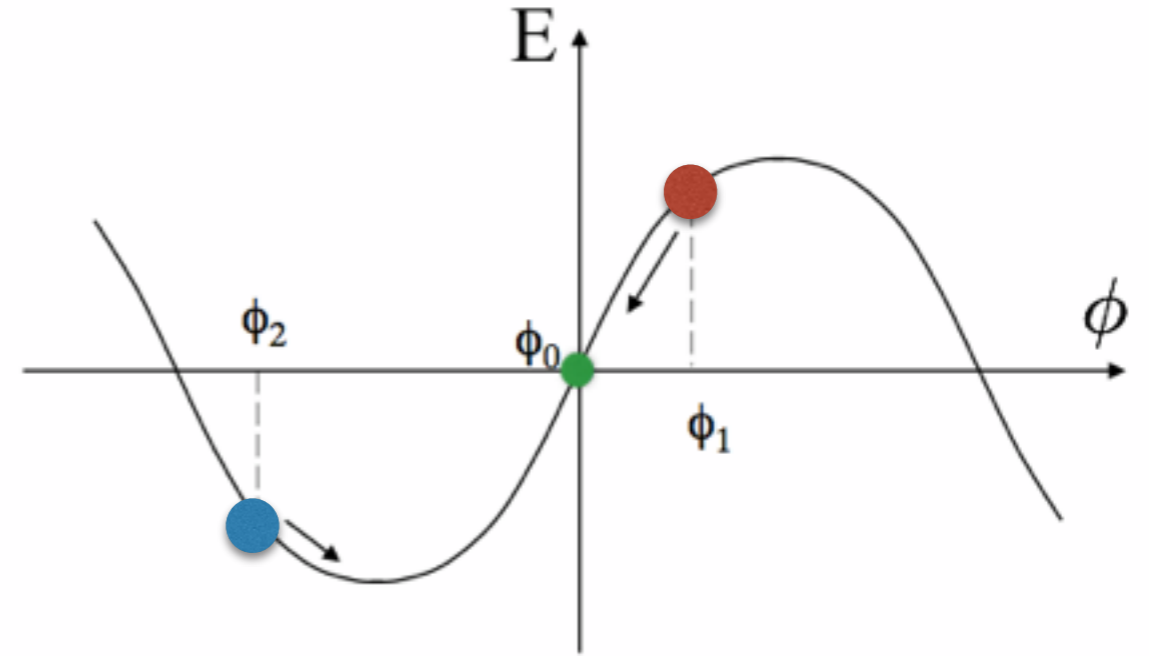
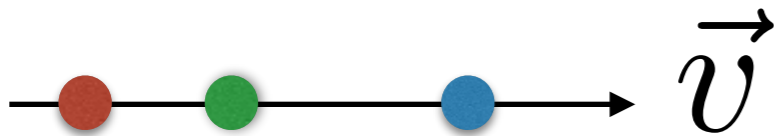
$$-\pi/2 \leq \phi_s \leq 0.$$



# Eşzamanlı faz = $-\pi/2$ derece

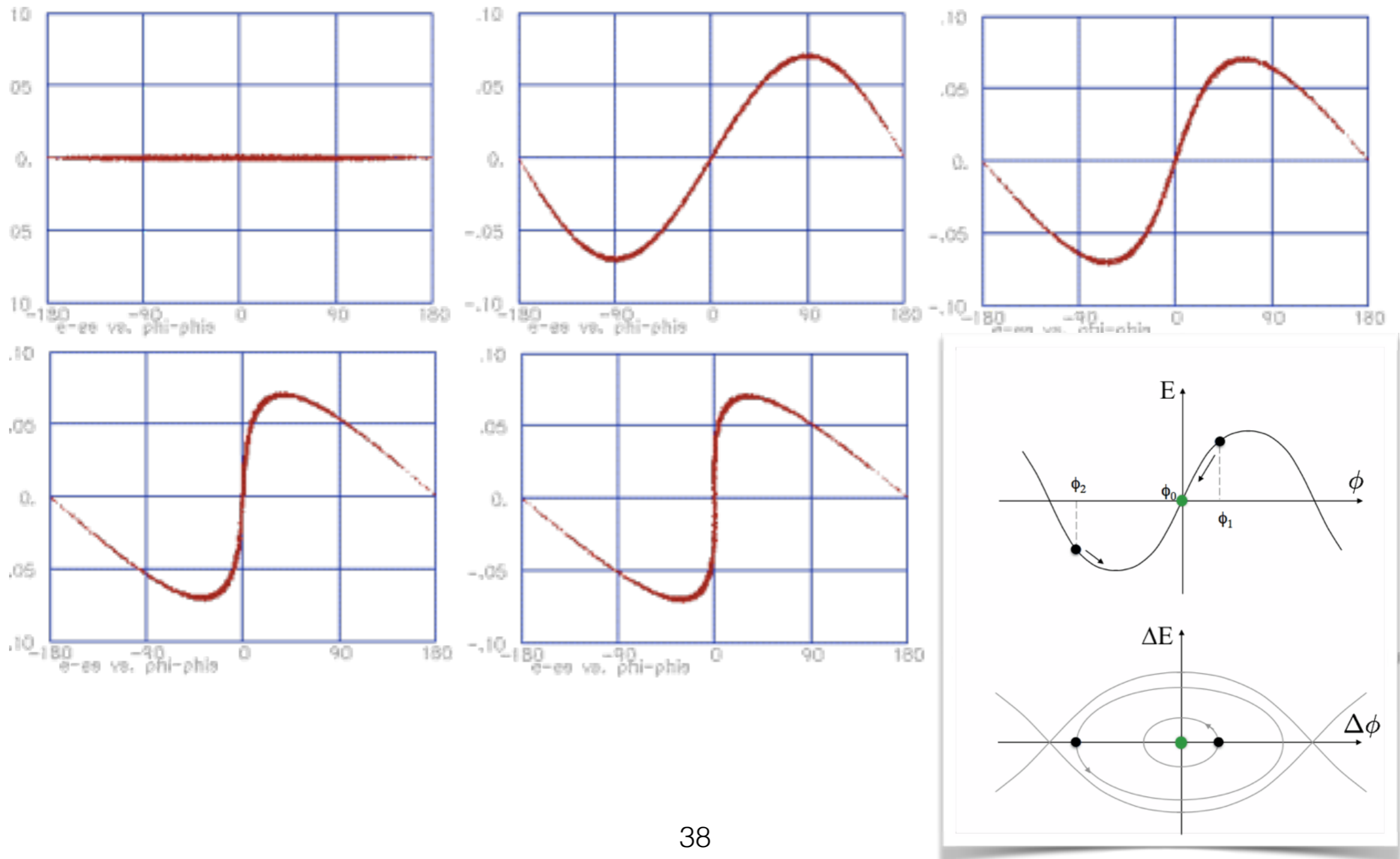
- Arka arkaya birsuru RF kovuğu olduğunu düşünün

**Gerçek uzay**



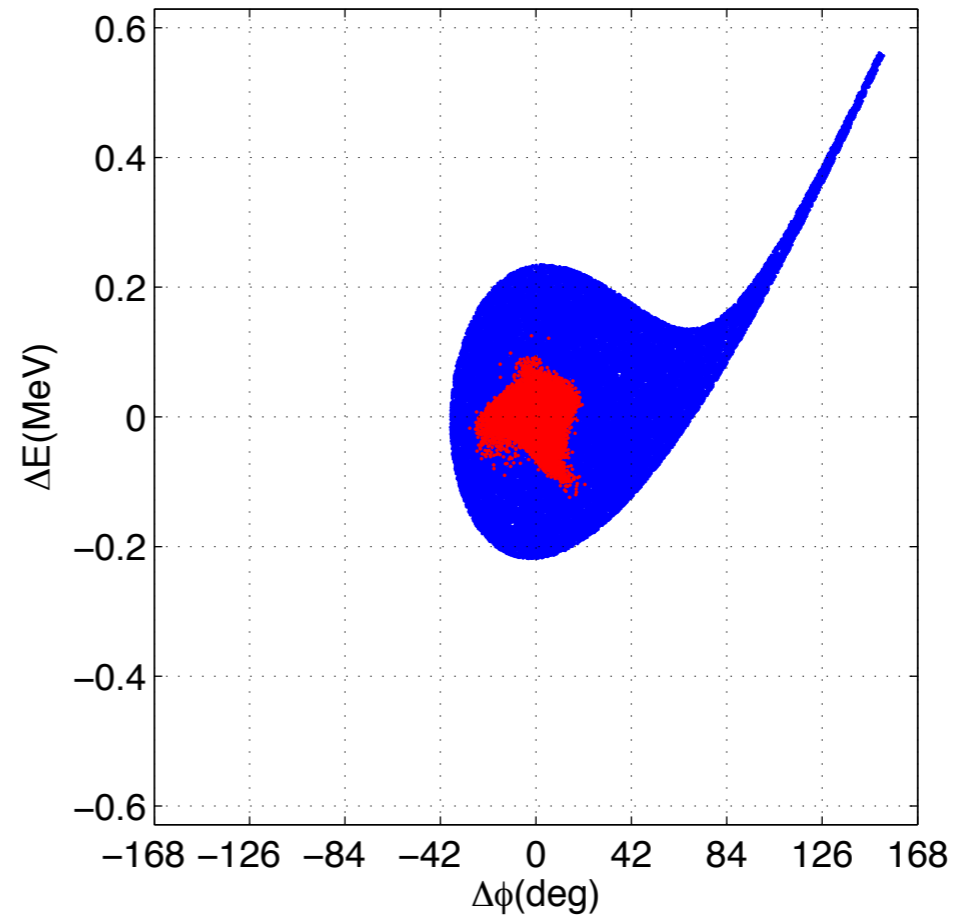
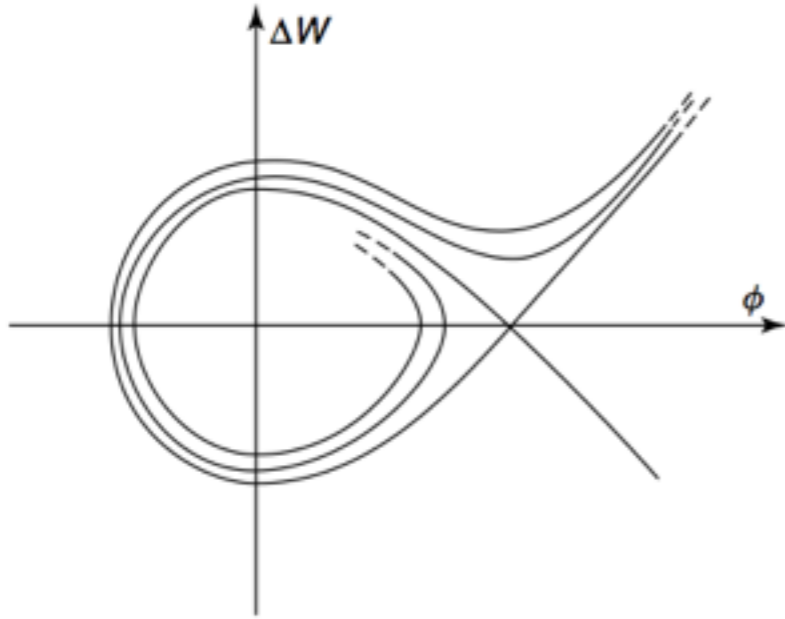
# Eşzamanlı faz = -90 derece

- Arka arkaya birsuru RF kovuğu olduğunu düşünün



# Hızlanma varsa (Linac4 ten örnek)

ardışık hızlanma boşluklarından sonra separatrix golf sopasına benzer.



DTL demet kabulü çalışmasından

# Kaynaklar

- Wangler, T., RF Linear Accelerators
- CAS (CERN accelerator school) ders notları.
- USPAS (US particle accelerator school) ders notları.
- Lallement, J-B, V. Dimov, JUAS, Linacs ders notları.
- JUAS, boyuna demet dinamiği ders notları.

# Teşekkürler!

Sorular ?

