

KUANTUM TÜNELLEME ZAMANI VE UYGULAMALARI

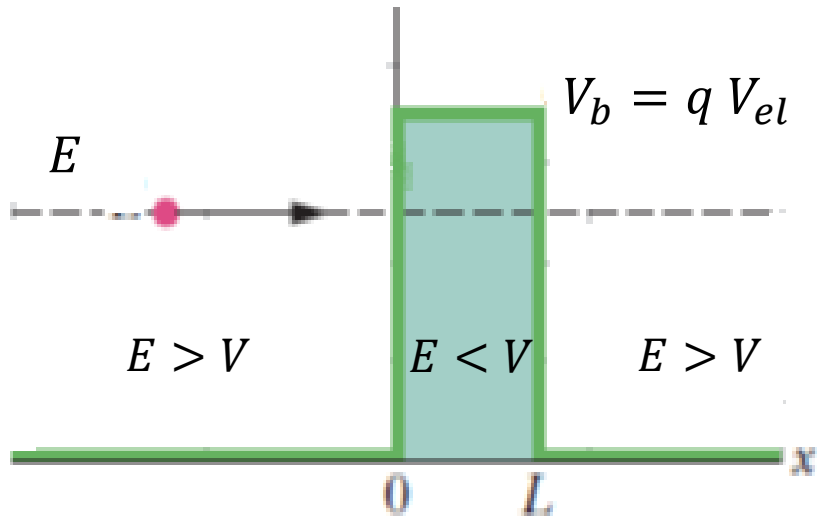
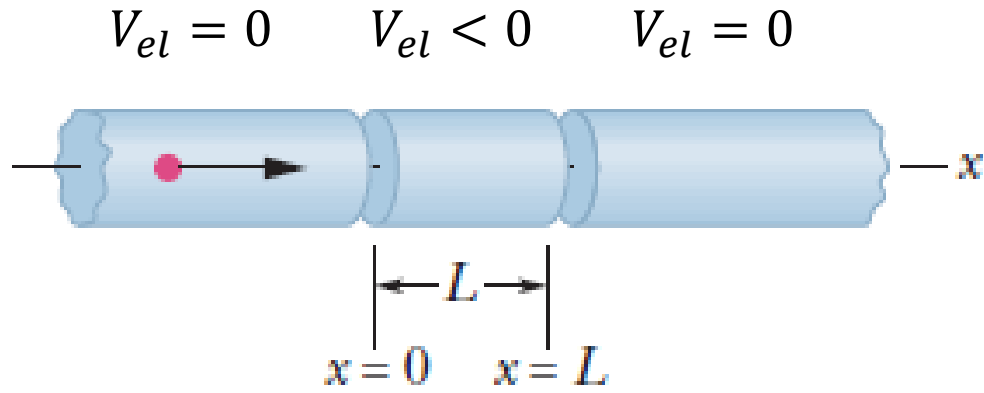
DURMUŐ ALİ DEMİR

Sabancı
Üniversitesi

GTÜ – IAPS Semineri (09/11/2022)

Kuantum Tünelleme Etkisi

Kuantum Tünelleme Etkisi



elektron telin $V_{el} < 0$ bölgesinden geçebilir mi?

Klasik mekanik:

Geçemez!

$x=0$ noktasından geri döner!

Kuantum Mekaniği:

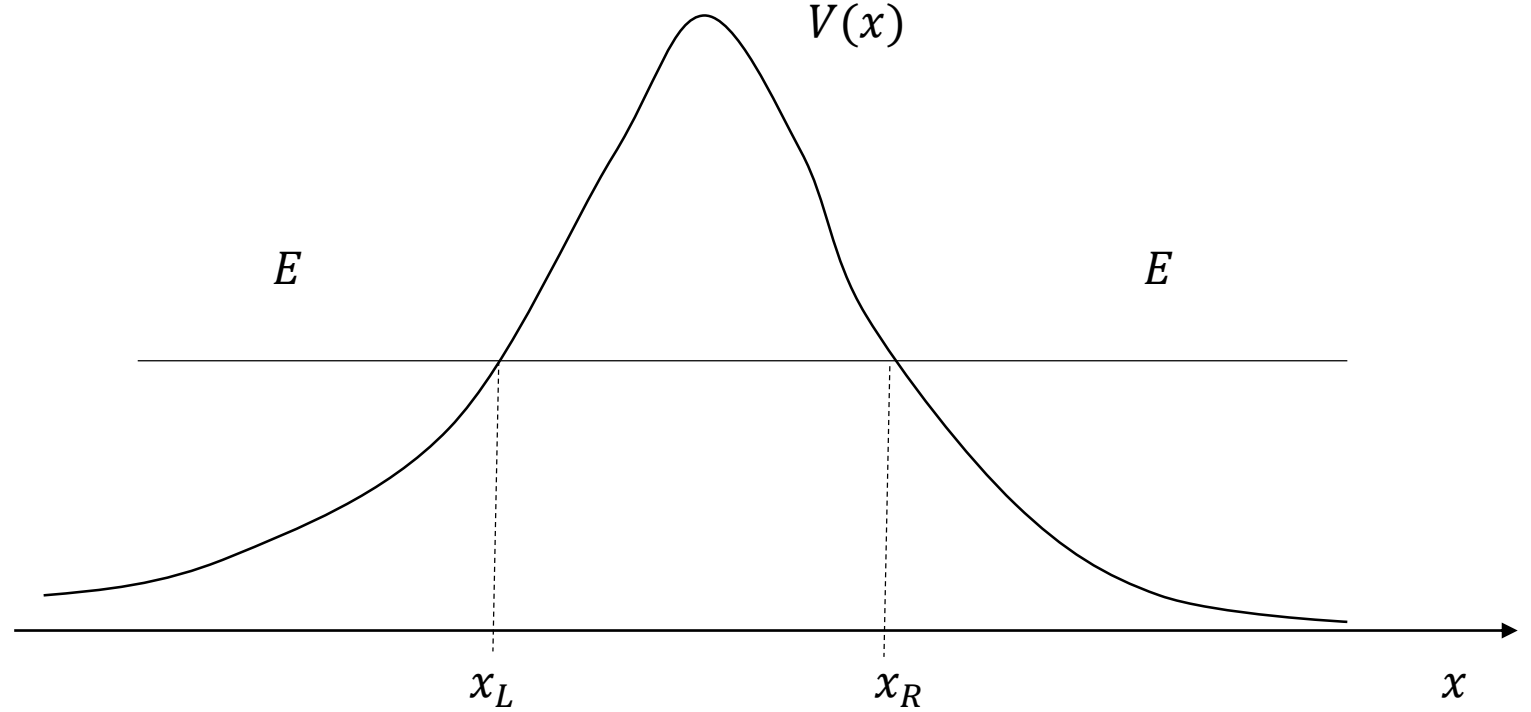
Geçebilir!

$x > L$ geçmek olasıdır!

geçiş olasılığı:

$$\mathcal{T} \sim e^{-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(V_b - E)} L}$$

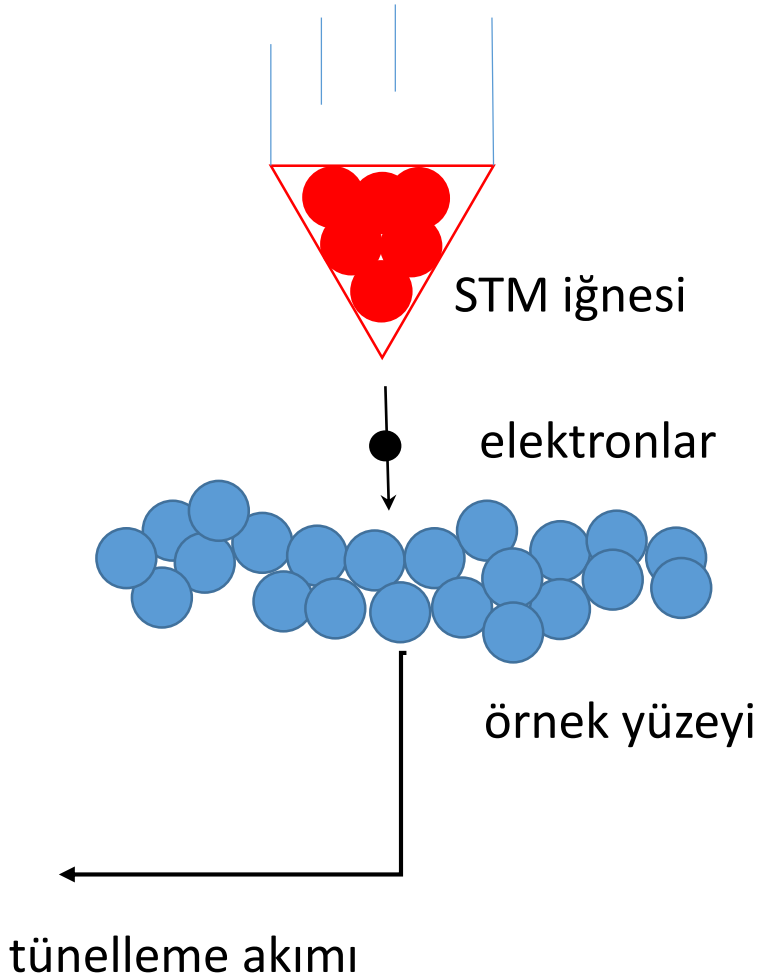
Kuantum Tünelleme Etkisi



- E = parçacığın toplam enerjisi
- $V(x)$ = parçacığın potansiyel enerjisi
- x_L = soldan gelen klasik parçacıkların geri dönüş noktası
- x_R = sağdan gelen klasik parçacıkların geri dönüş noktası

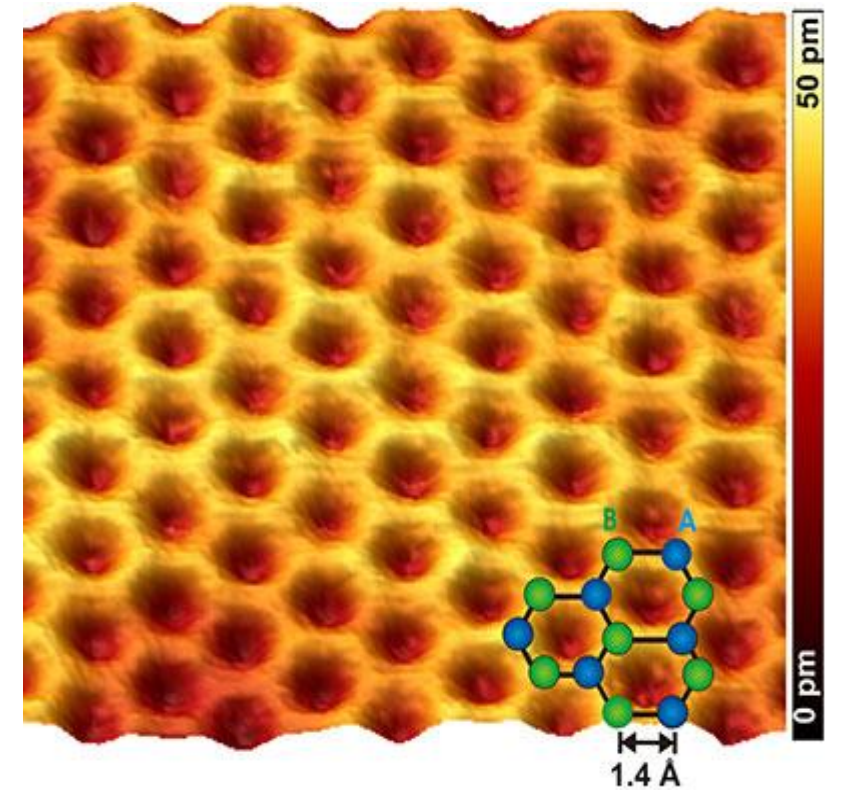
Kuantum Tünelleme Örnekleri

Elektron Tünelleme Mikroskobu (STM)



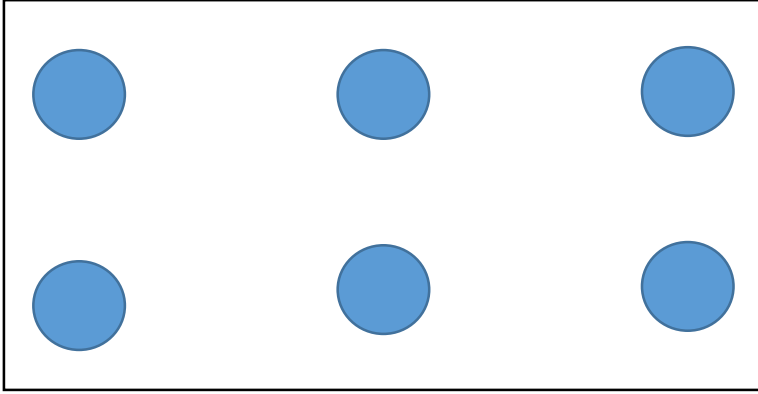
(Binnig & Rohrer, 1986 Nobel Ödülü)

(<http://www.nanoscience.de>)

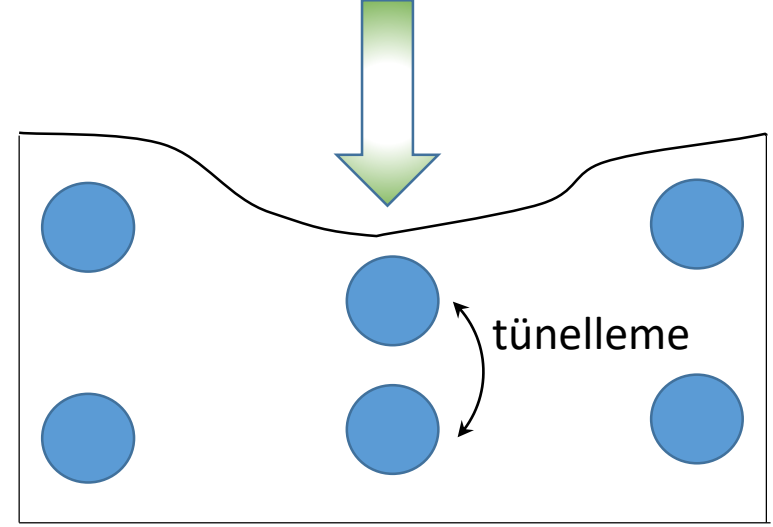


(Grafen yüzeyi, $I_{\text{tün}} = 10 \text{ pA}$)

Tünellemeli Kompozit Malzemeler (QTC)

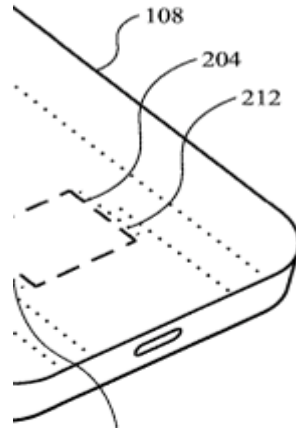


(basınç yok, iletkenlik yok)



(küçük basınç, yüksek iletkenlik)

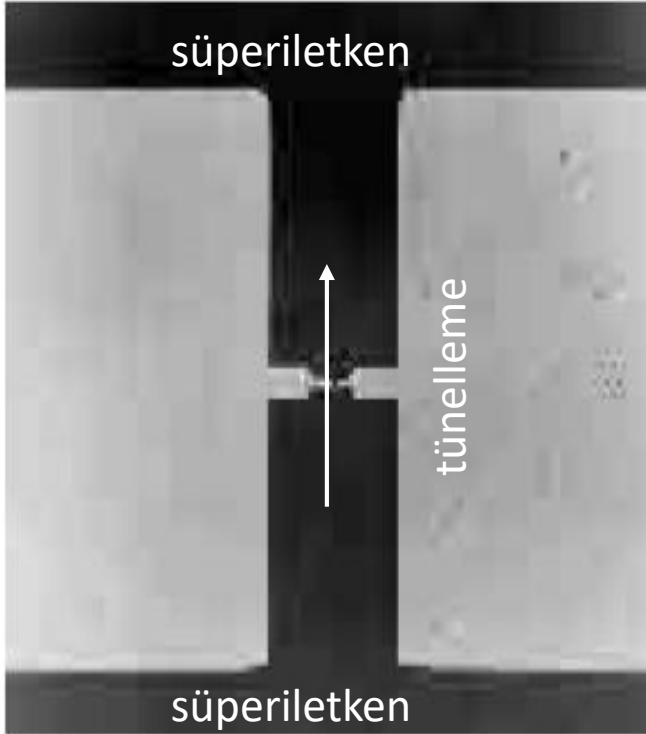
yeni Apple patenti:
tuşları olmayan cep
telefonu



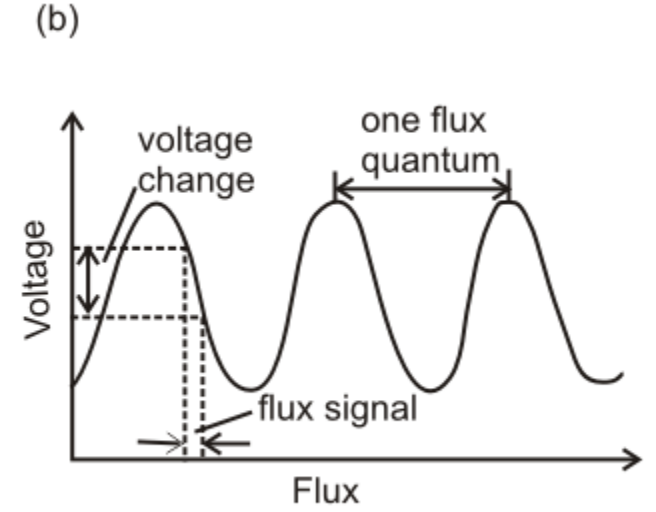
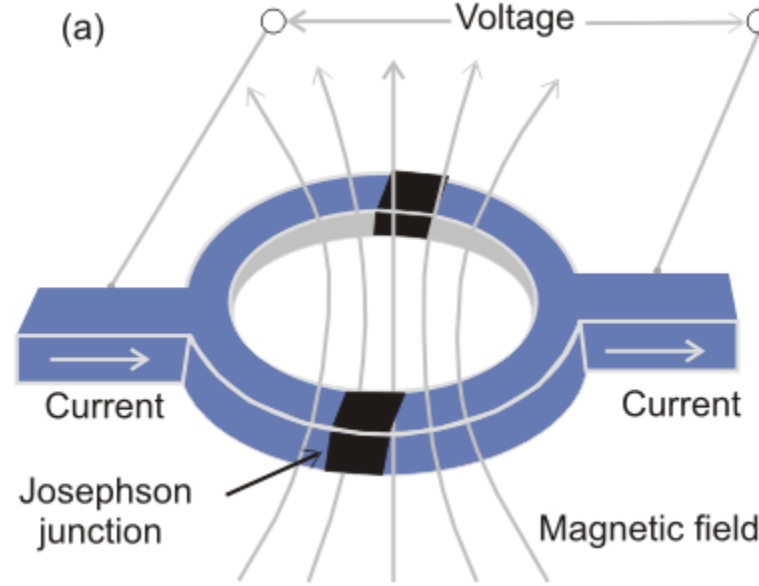
+ elbiseler, bilgisayarlar, piyanolar, ...

Josephson Etkisi ve SQUIDS

(<http://www.phy-astr.gsu.edu/>)



(B. Josephson, Nobel Ödülü 1975)

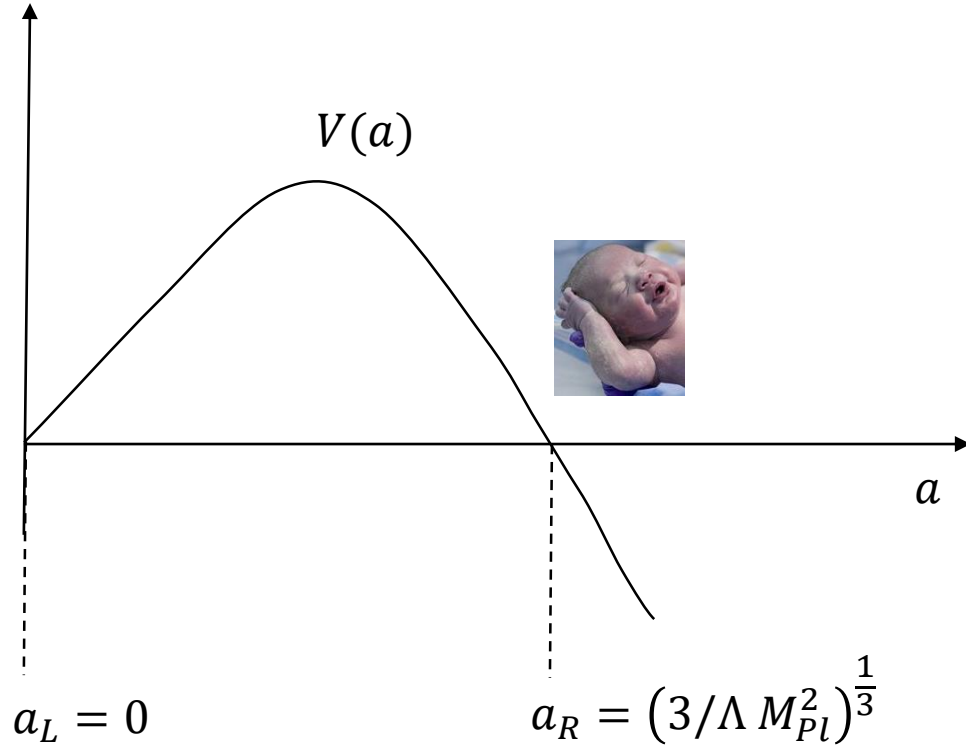


SQUIDS : 10^{-14} Tesla hassasiyet ile manyetik alan ölçümü

kalpte: 10^{-10} Tesla

beyinde: 10^{-13} Tesla

Evrenin Oluşumu



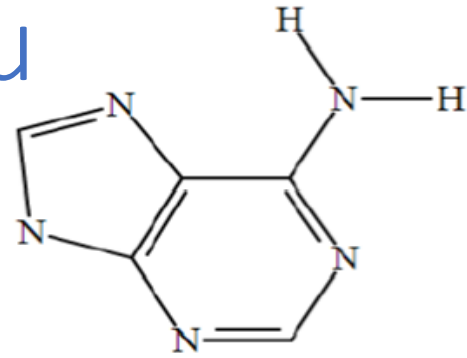
Evrenin oluşumu esasen M_{Pl} kütleli ve $E = 0$ enerjili bir parçacığın şu potansiyelden tünellemesidir

$$V(a) = \frac{9 \pi^2 M_{Pl}^2 a}{8} \left(1 - \frac{\Lambda M_{Pl}^2 a^3}{3} \right)$$

öyle ki Λ kozmojik sabittir.

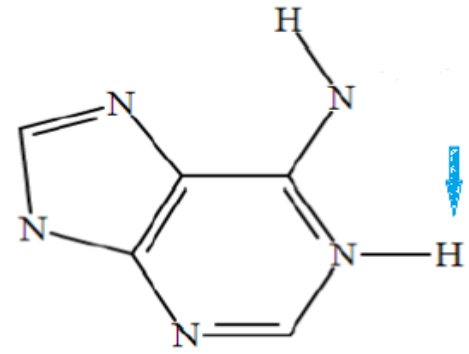
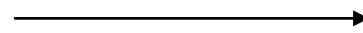
$$M_{Pl} = (8\pi G_N)^{-\frac{1}{2}}$$

DNA Mutasyonu

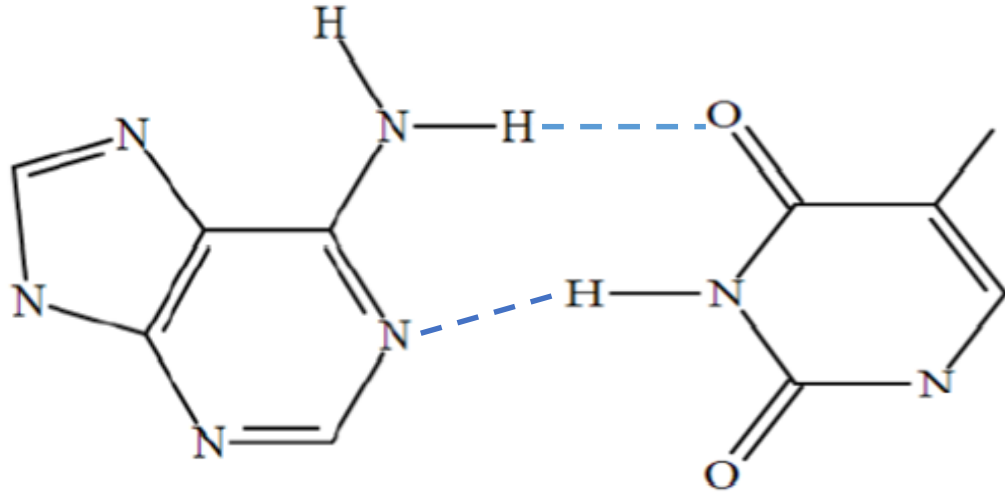


Adenine

proton tünellemesi

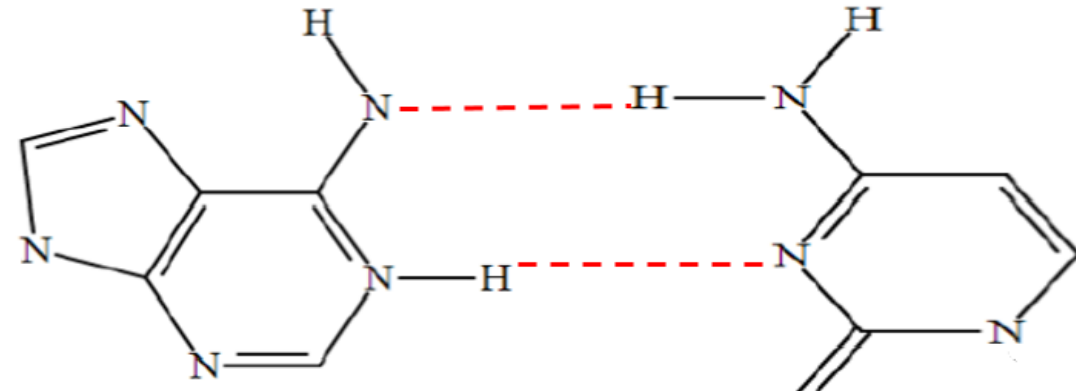
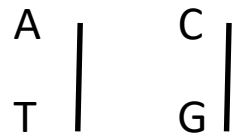


Adenine*



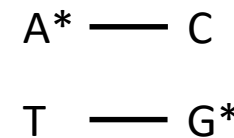
Adenine

Thymine

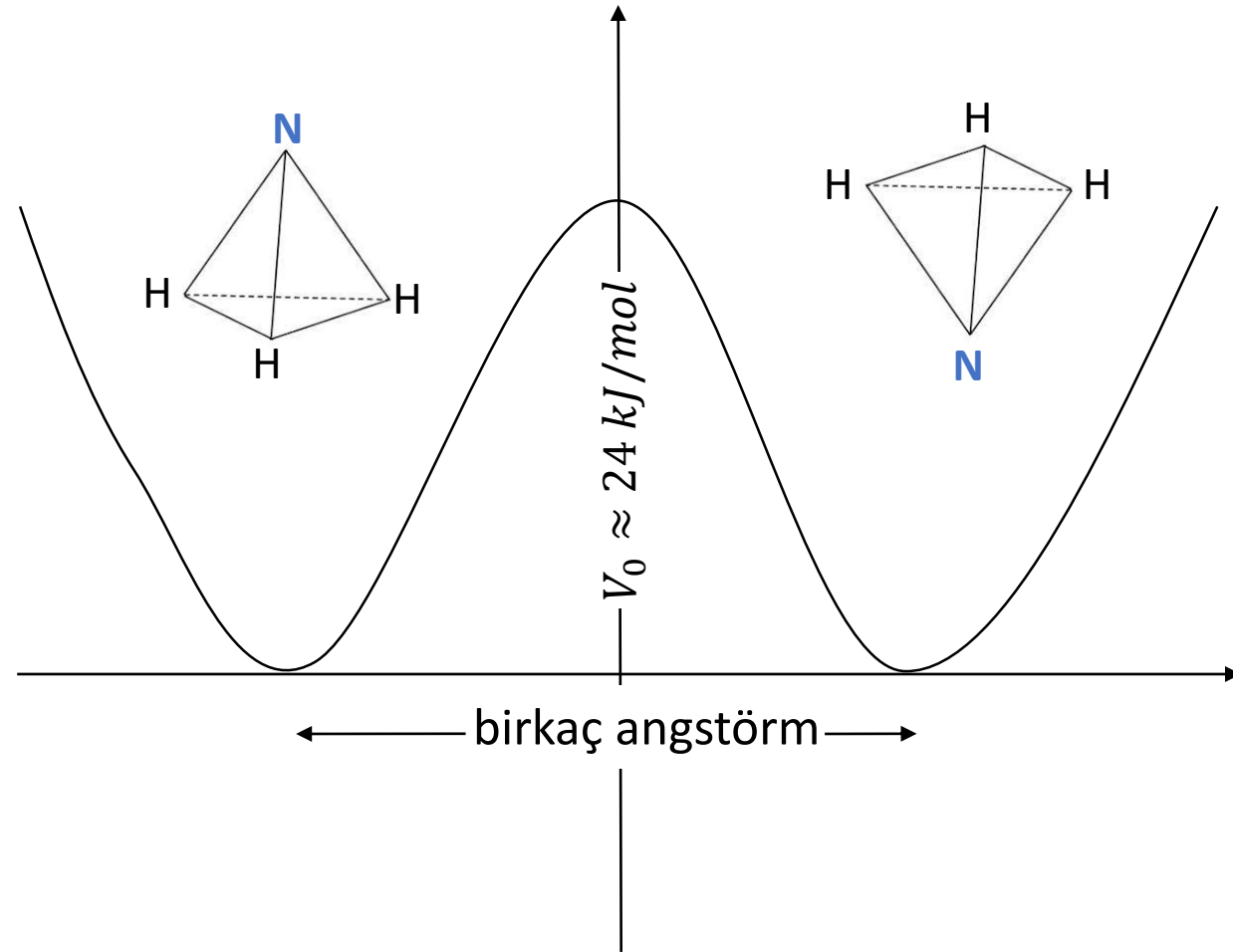


Adenine*

Cytosine



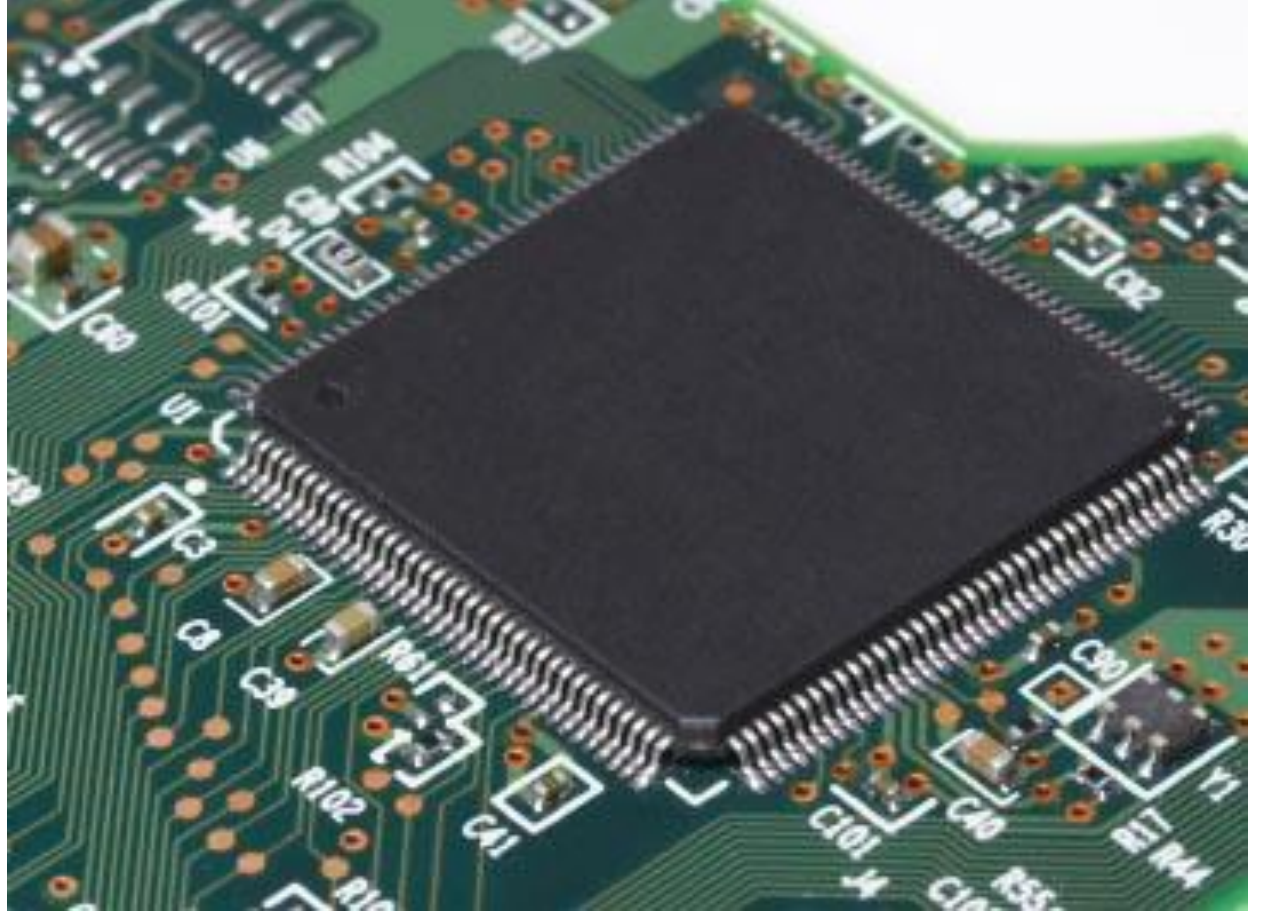
Nitrat Terslenmesi



MASER: mikrodalga EM radyasyon (GHz frekanslar)

Entegre Devreler

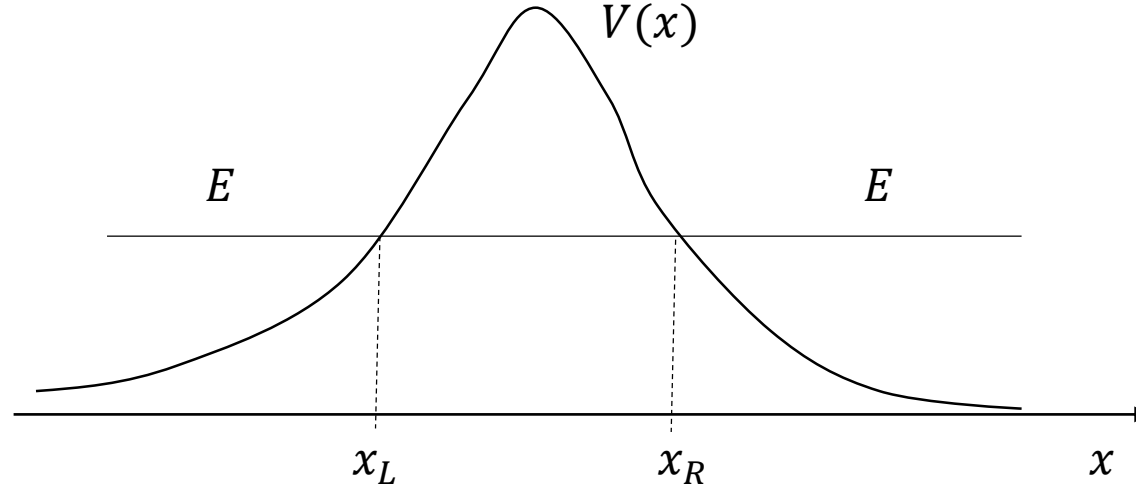
Entegre Devreler en çok 4nm büyüklüğe kadar indirebilir çünkü bir transistör veya diyottaki elektronlar başka devre elemanlarına tünelleme yaparlar.. Tünelleme elektronik yapıpara bir büyüklük sınırı getirir..



(https://cecas.clemson.edu/cvel/emc/ic_emc/)

Kuantum Tünelleme Zamanı

Tünelleme Zamanı



Tünelleme Zamanı = parçacığın x_L den x_R noktasında ulaşması için geçen zaman

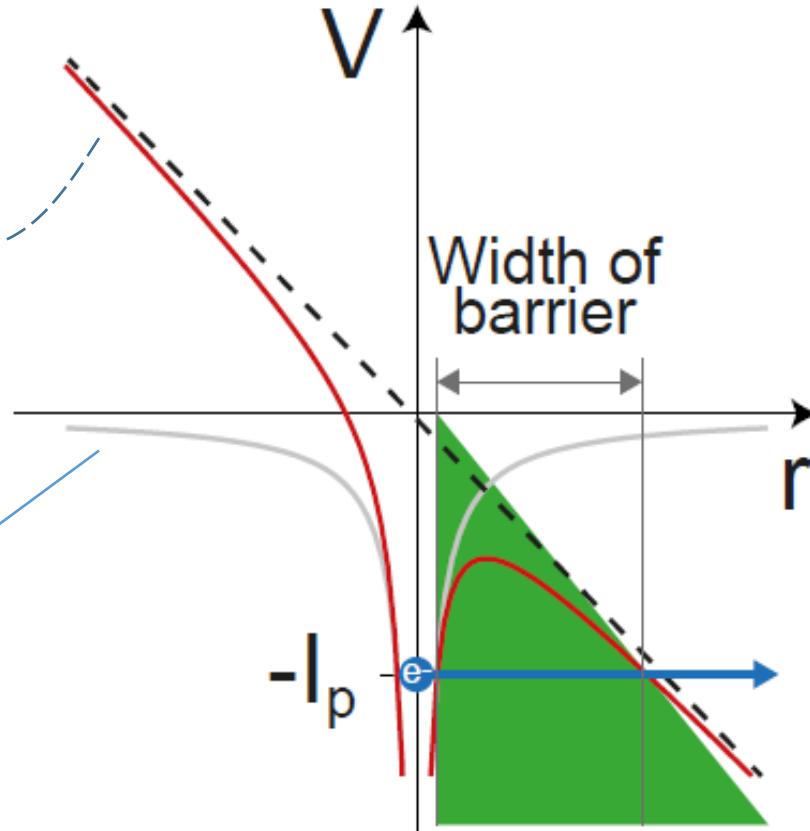
Deney: Ölçümler mevcut!

Kuram: Tünelleme zamanını bilemeyiz/hesaplayamayız
(Zaman kuantum kuramında bir gözlenebilen değildir)

Deneyleme Ortamı

$$V_{laser}(r) = (-e) \times (-\vec{r} \cdot \vec{\mathcal{E}})$$

$$V_{coul}(r) \propto -1/r$$



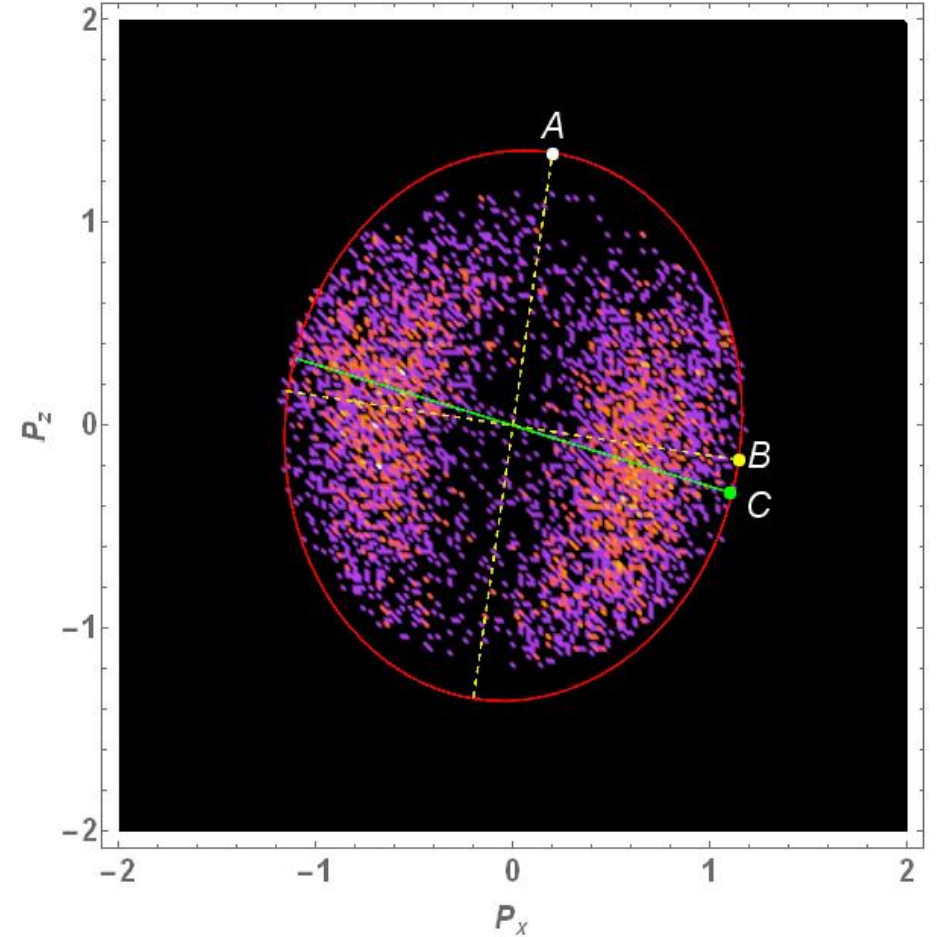
$$\text{Tünelleme iyonizasyonu: } \gamma = \frac{\sqrt{I_p} \omega}{\mathcal{E}} \approx 1$$

- ω = lazer frekansı
- \mathcal{E} = elektrik alanın tepe değeri

(A. Landsman et al, *Optica* 1 (2016) 343)

Deneyleme Yöntemi

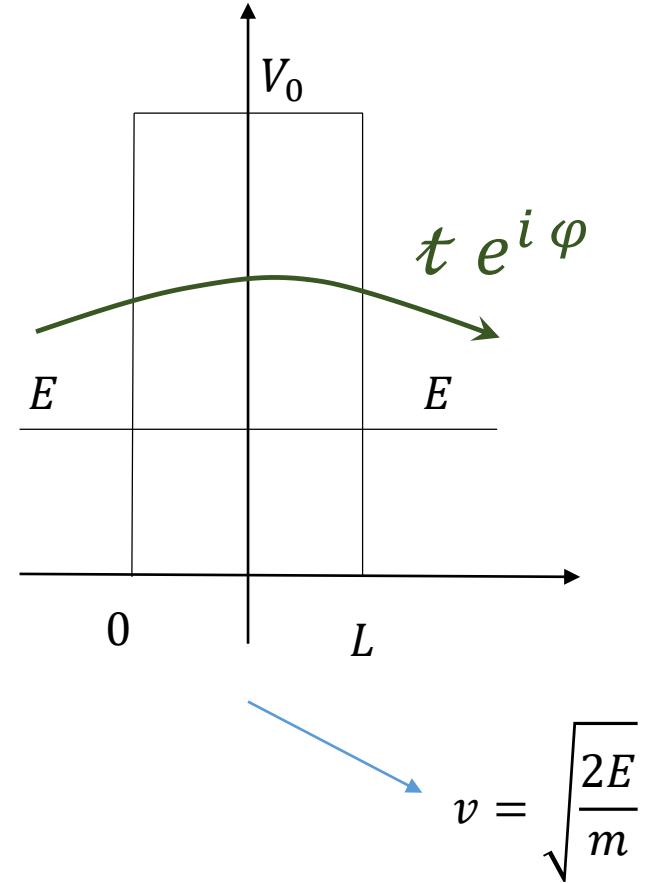
- Femtosaniye lazer darbeler (pulse) Coulomb potansiyelini bükerek «tünelleme iyonizasyonuna» yol açar.
- Dairesel-polarize elektrik alanı (A eksen) için vektör potansiyel dönen elektrik alanını 90° faz farkıyla izler. Tünelleyen elektronlar dolayısıyla elektrik alanına dik yönde yayılmalıdırlar (B eksen)
- Elektron yayılma yönündeki herhangi bir kayma (C eksen) tünelleme esnasında oluşan «gecikme» için bir göstergedir. Tünelleme zamanının sıfırdan farklı olduğunu kanıtlar.
- Örnek olarak, 2.6 fs darbede 1° kayma $\frac{2.6 \text{ fs}}{360^\circ} \approx 7.13 \text{ attosaniye}$ gecikmeye karşılık gelir (tünelleme zamanı).



(U. Sainadh et al, arXiv:1707.05455 (2017))

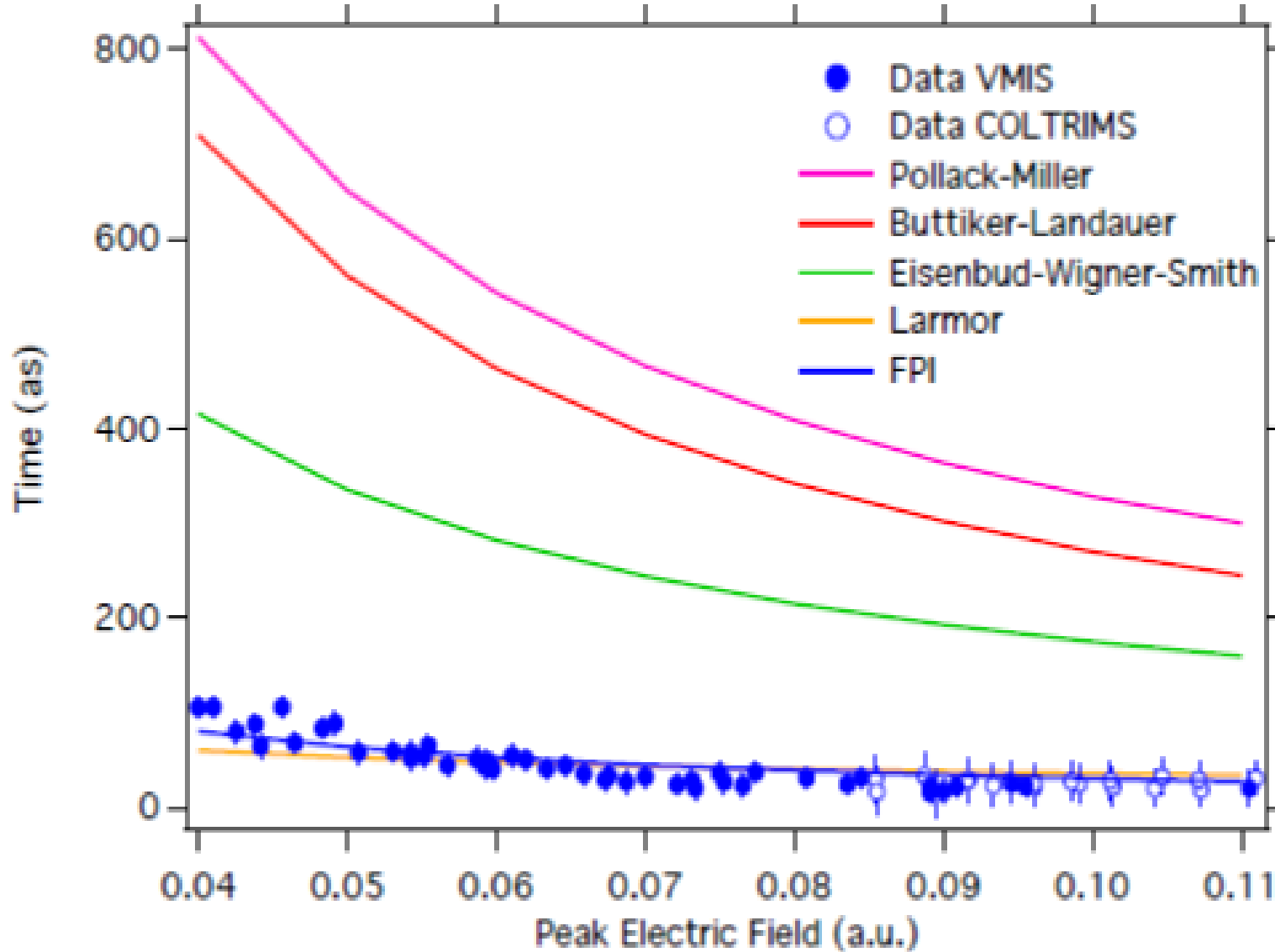
Modelleme (Dalga Mekanikliği)

Tünelleme Zaman Modeli	$L \rightarrow \infty$	$\hbar \rightarrow 0$
$(\Delta t)_{BL} = -\hbar \frac{\partial \ln \tau}{\partial V_0}$	$\frac{\hbar}{V_0} \sqrt{\frac{E}{V_0 - E}}$ / ∞	0 / ∞
$(\Delta t)_{LM} = -\hbar \frac{\partial \varphi}{\partial V_0}$	$\frac{\hbar}{V_0} \sqrt{\frac{E}{V_0 - E}}$ / ∞	0 / ∞
$(\Delta t)_{PM} = +\hbar \frac{\partial \ln \tau}{\partial E}$	$\frac{\hbar}{E} \sqrt{\frac{E}{V_0 - E}}$ / ∞	0 / ∞
$(\Delta t)_{EW} = +\hbar \frac{\partial \varphi}{\partial E} + \frac{L}{v}$	∞ (elle ekleme)	$\frac{L}{v}$ / ∞



temel fizikle uyumsuz sonuçlar

Model-Deney Karşılaştırması



bilinen tüm «tünelleme zamanı» modelleri deney tarafından dışlanmış durumda

$(\Delta t)_{LM} = \text{Re}\{(\Delta t)_{FPI}\}$ ve $|(\Delta t)_{FPI}|$ deneye uyar zira öyle kalibre edildiler.

Entropik Tünelleme Zamanı

Parçacıksal Dinamik

- Enerjinin korunumu momentumu belirler:

$$\frac{p^2}{2m} + V(x) = E \Rightarrow p(x) = \sqrt{2m(E - V(x))}$$

- Momentum tamamiyle sanaldır ($i = \sqrt{-1}$):

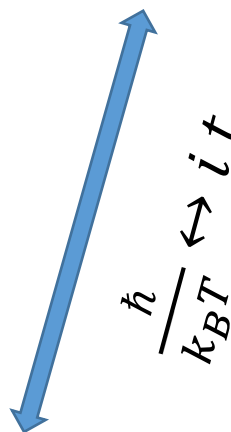
$$\sqrt{2m(E - V(x))} = i \sqrt{2m(V(x) - E)} \Rightarrow \wp(x) \equiv \sqrt{2m(V(x) - E)}$$

- Klasik olarak hesaplanan zaman tamamiyle sanaldır:

$$\int_{x_L}^{x_R} \frac{m dx}{p(x)} = \int_{x_L}^{x_R} \frac{m dx}{i \wp(x)} \Rightarrow \tau_c \equiv \int_{x_L}^{x_R} \frac{m dx}{\sqrt{2m(V(x) - E)}}$$

İstatistiksel Resim

- Sanal zaman ~ Sıcaklık
- Propagatörler \Leftrightarrow Partisyon fonksiyonları
- Peki ama «tek parçacık» için istatistik ne demektir?
Mikrodurumlar (micro states) nelerdir? Nasıl sayılacaklar?

$$\text{KM: } U = \sum_n e^{-\frac{i}{\hbar} E_n t}$$

$$\text{SM: } Z = \sum_n e^{-\frac{E_n}{k_B T}}$$

Entropik Tünelleme Zamanı

(D. D, T. Guner, *Annals of Physics*, 386 (2017) 291)

$$(\Delta t)_{ETT} \equiv \frac{k_B \tau_c}{S}$$

von Neumann entropisi

ETT sublüminaldır:

$$(\Delta t)_{ETT} \rightarrow \infty \text{ as } L \rightarrow \infty$$



ETT fizikseldir:

$$(\Delta t)_{ETT} \rightarrow \infty \text{ as } V_0 \rightarrow \infty$$

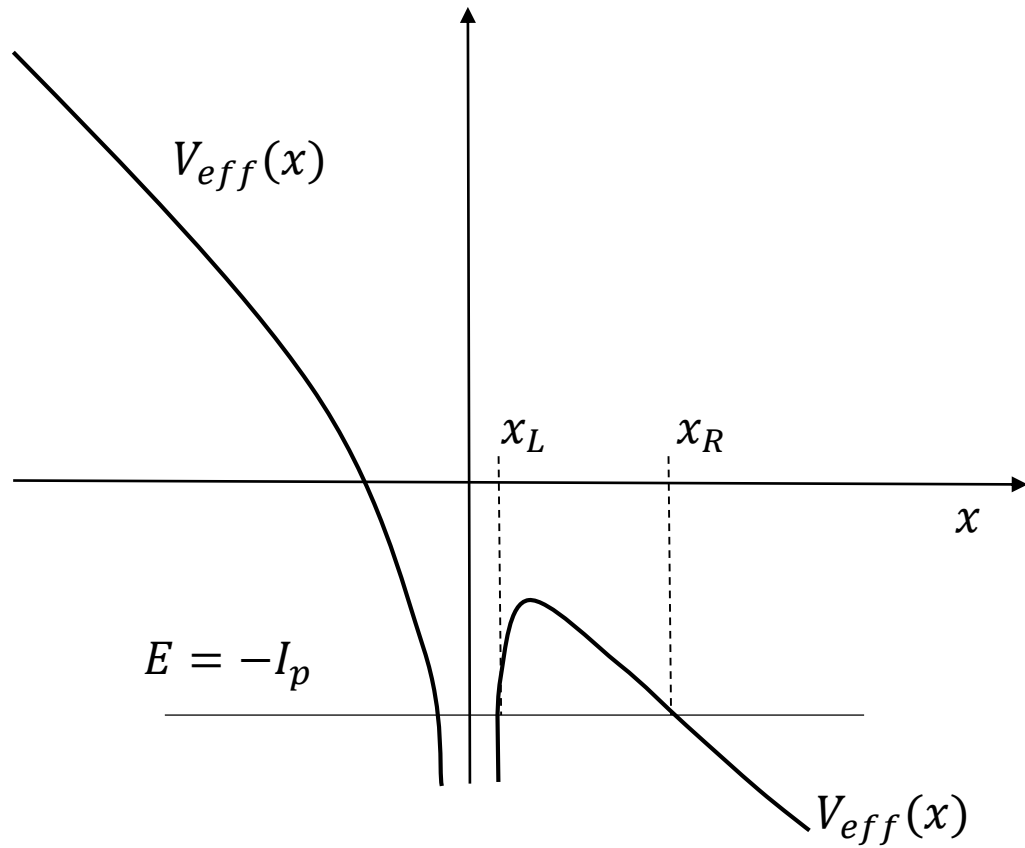


ETT saf kuantumdur:

$$(\Delta t)_{ETT} \rightarrow \infty \text{ as } \hbar \rightarrow 0$$



He Tünelleme İyonizasyonu



He^+ iyonundan x mesafede etkin potansiyel:

$$V_{eff}(x) = -\frac{Z_{eff}(x)}{x} - \mathcal{E} x$$

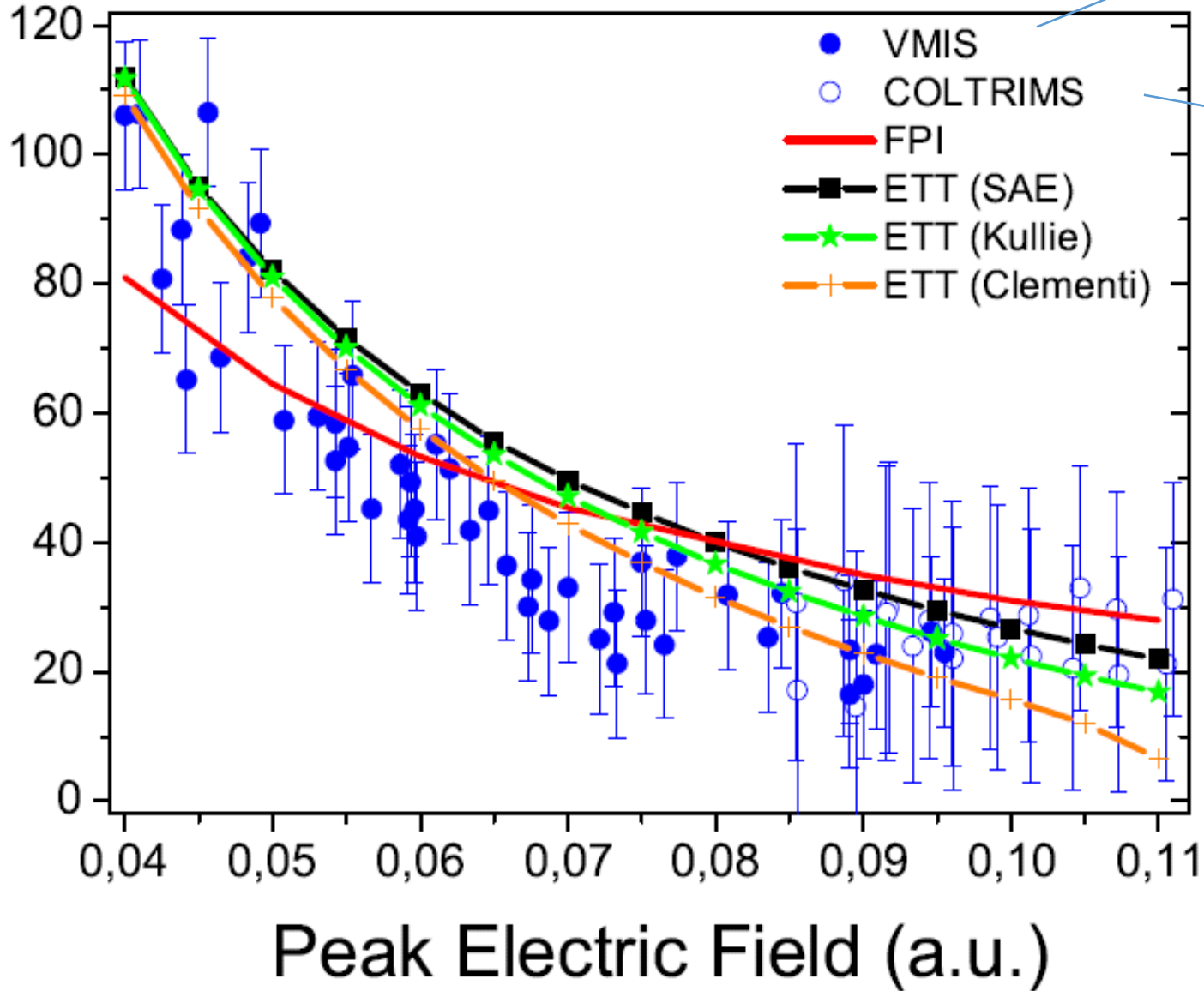
- $Z_{eff}(\text{SAE}) = 1 + 1.231 e^{-0.662x} - 1.325 e^{-1.236x} - 0.231 e^{-0.48x}$
- $Z_{eff}(\text{Kullie}) = 1.375$
- $Z_{eff}(\text{Clementi}) = 1.6875$

(SAE: X. Tong & C. Lin, *J. Phys. B* 38 (2005) 2593)

(Kullie: O. Kullie, *J. Phys. B* 49 (2016) 095601)

(Clementi: E. Clementi & D. Raimondi, *J. Chem. Phys.* 49 (1963) 2686)

ETT'nin Deneysel Testi



Hız Dönüşüm Spektrometresi (VMIS)

Sıçrama Momentumu Spektrometresi (COLTRIMS)

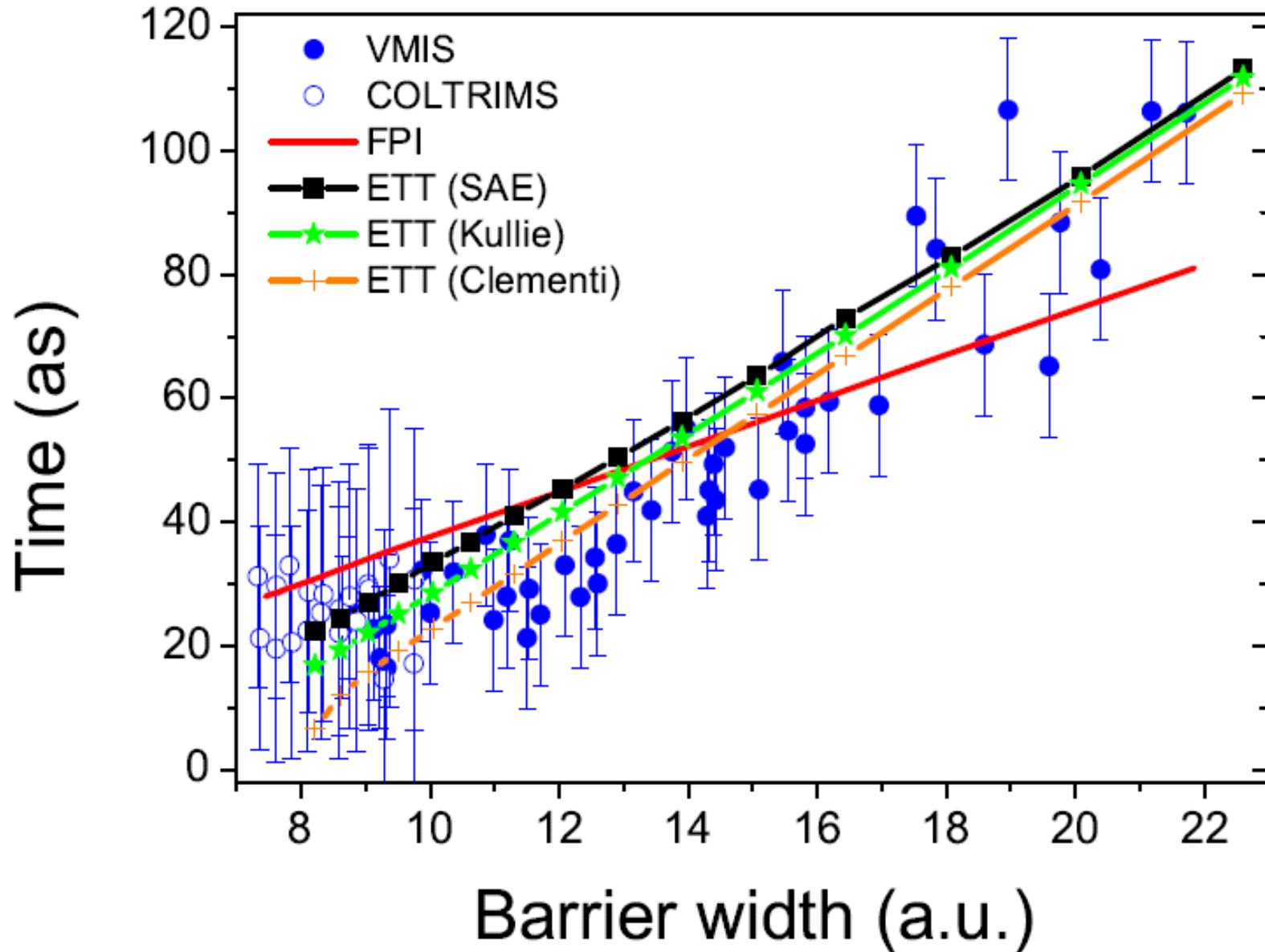
(D. D, T. Guner, *Annals of Physics*, 386 (2017) 291)

(A. Landsman et al, *Optica* 1 (2016) 343)

ETT'nin Deneysel Testi

(D. D, T. Guner, *Annals of Physics*, 386 (2017) 291)

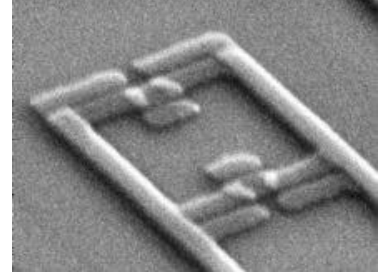
(A. Landsman et al, *Optica* 1 (2016) 343)



Tünelleme Etkisine Dayanan Kuantum Bilgisayarı

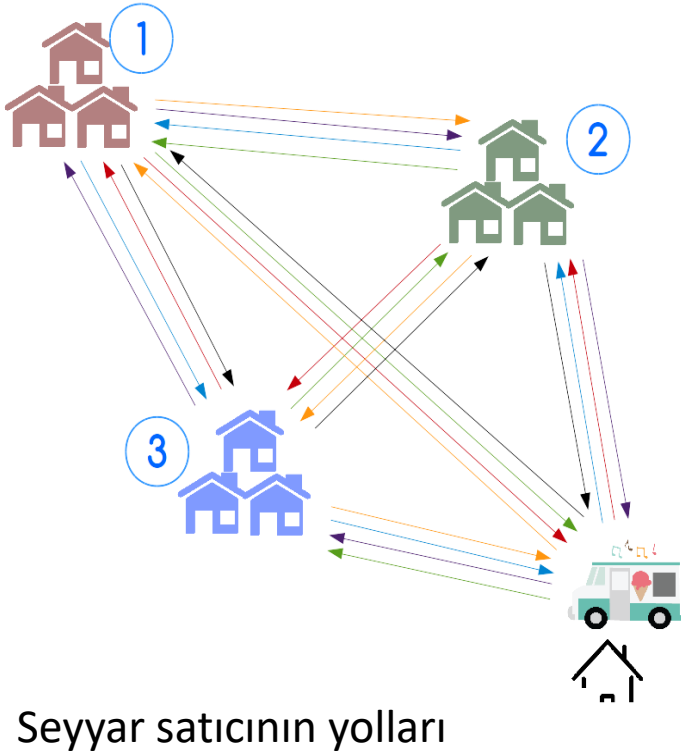


- "flux qubit"
(programlanabilir entegre)

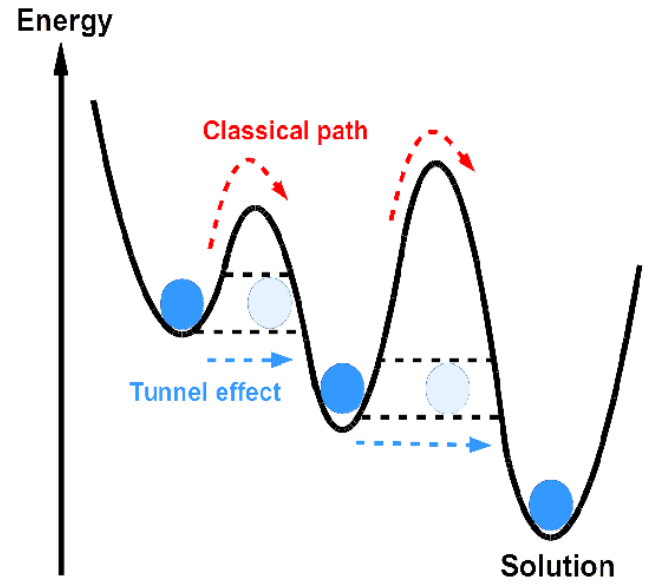


- 1 milyondan fazla Josephson junction
- Josephson junction'lardaki tünellemeler ile system en düşük enerji düzeyine iner.
- Her junction'da 1 femtosaniye gecikme olsa toplamda kabaca 1 nanosaniye gecikme olur. Tünelleme zamanı önemlidir

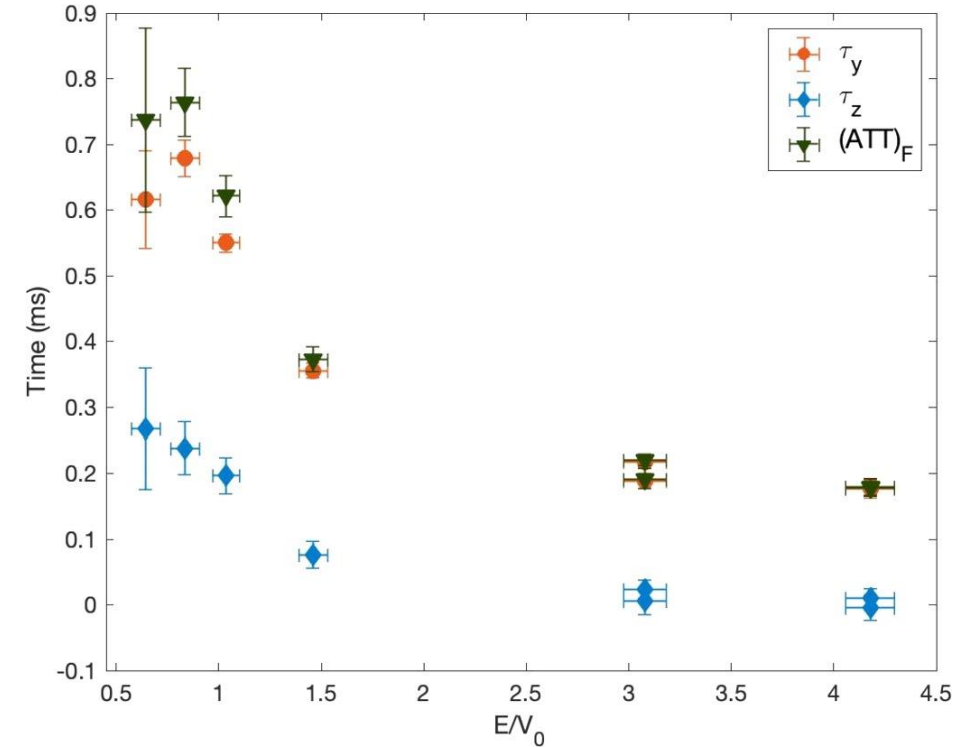
KUANTUM SİMÜLATÖRÜ TÜNELLEME ETKİSİ İLE ÇALIŞIYOR



(medium.com)



Kuantum tünelleme etkisi ile



(Demir, 2022)

Tünelleme Etkisine Dayanan Kuantum Bilgisayarı



- Makroskopik sistemler (araba, insan, ...) buldukları minimuma takılırlar.
- Minimumdan çıkmanın yolu tepeye tırmanmaktır.

Tünelleme Etkisine Dayanan Kuantum Bilgisayarı



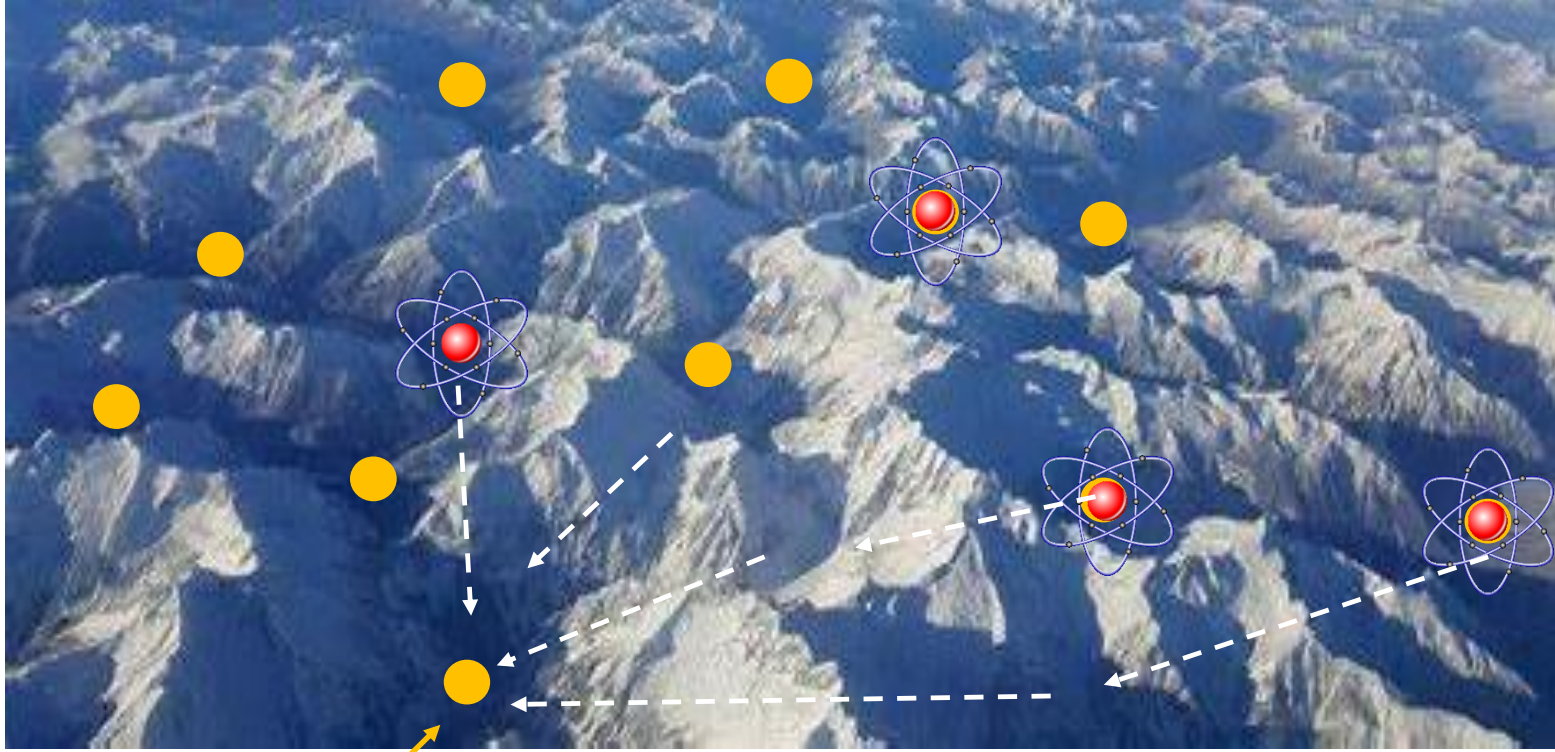
en derin minimum

- Mikroskopik sistemler “yeterince beklenirse” en derin minimuma “kendiliklerinden” inerler. Buldukları çukurdan daha derin olanı bulurlar (tünelleme etkisi)

(dejenere durumlar da olabilir)

(DD, Ozan Sargın, Work in progress)

Tünelleme Etkisine Dayanan Kuantum Bilgisayarı

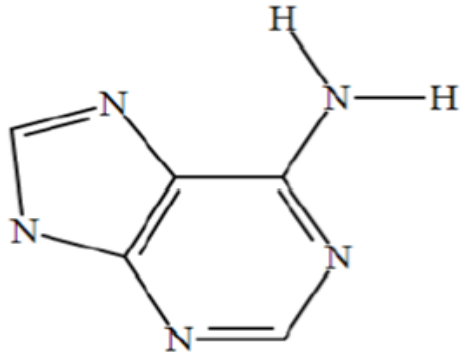


en derin minimum = kombinatorik problemin çözümü

Tünelleme etkisi optimizasyon problemlerinin çözümüne el verir.

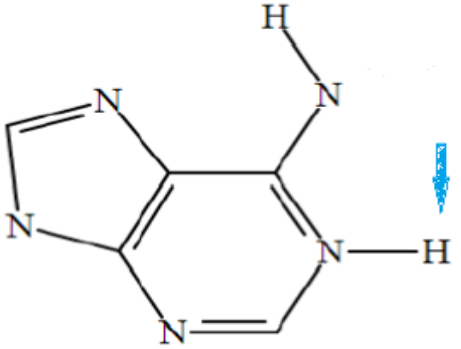
- Sicim kuramında doğru minimumun bulunması gibi..
- Gezgin satıcı probleminde (NP-hard problem) doğru kombinasyonun bulunması gibi..

DNA Nokta Mutasyonu

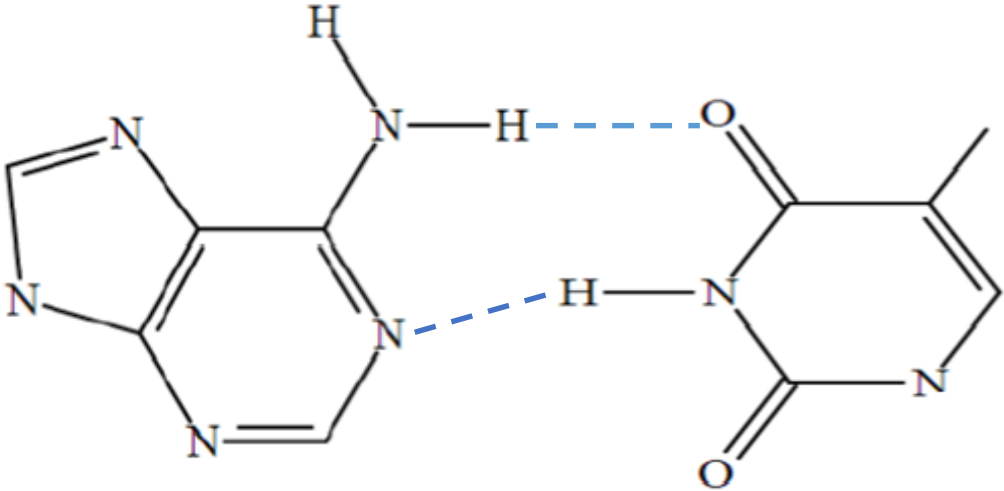


Adenine

proton tünellemesi
 →



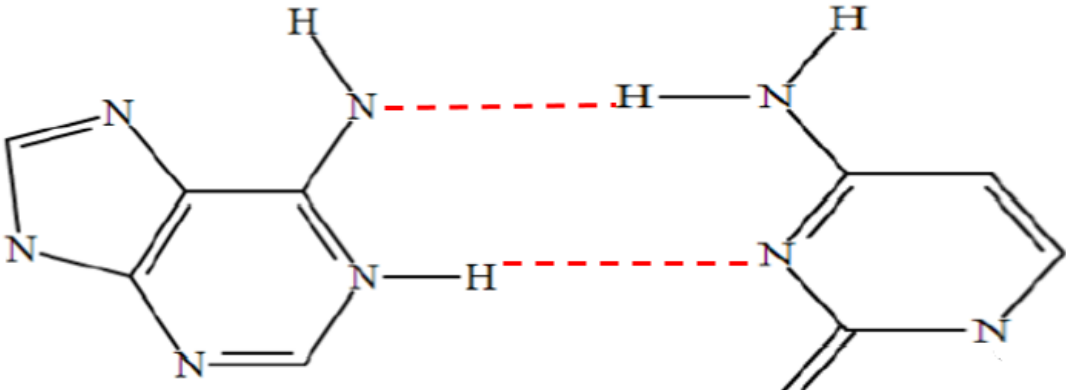
Adenine*



Adenine

Thymine

A		C
T		G



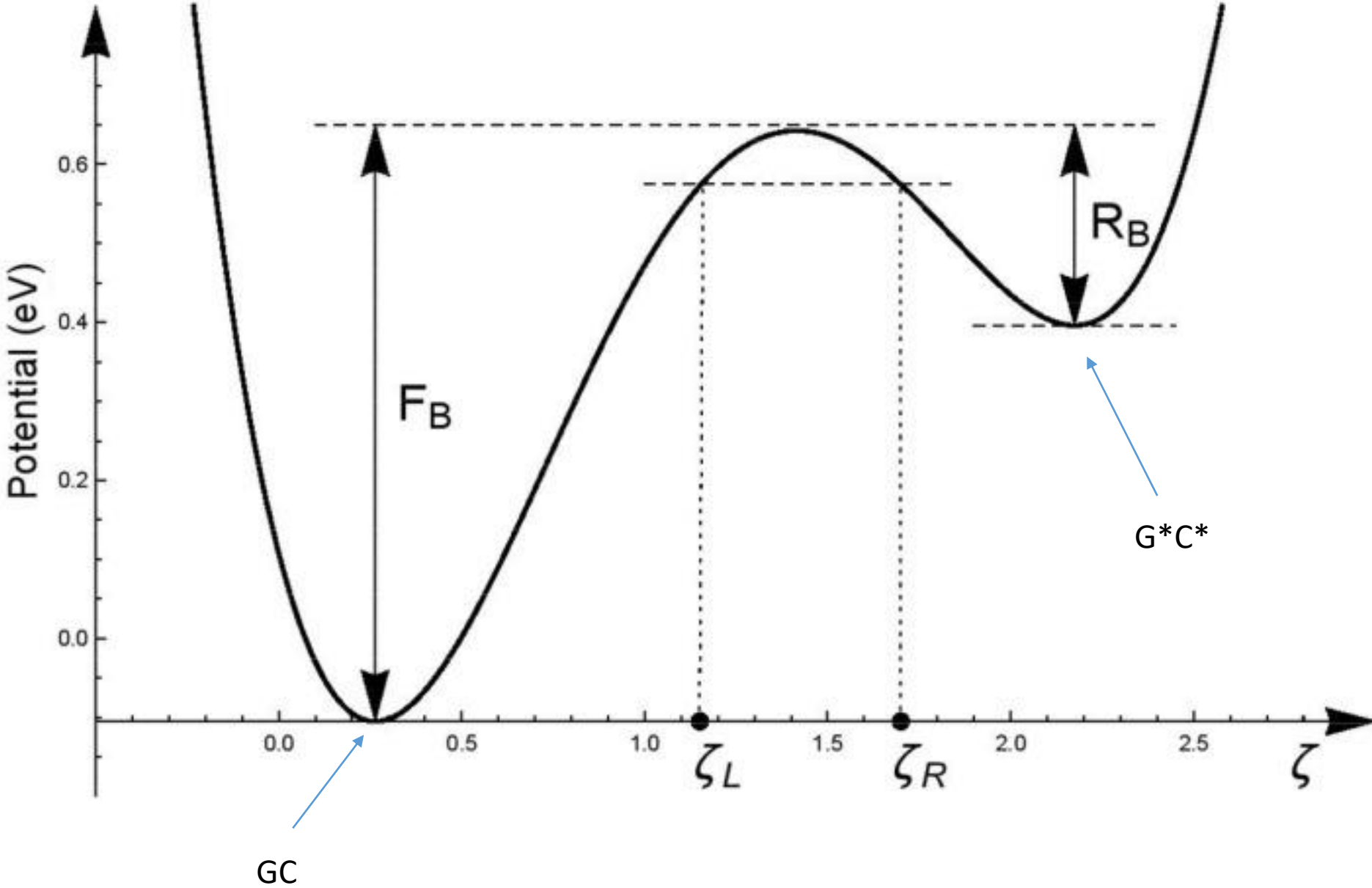
Adenine*

Cytosine

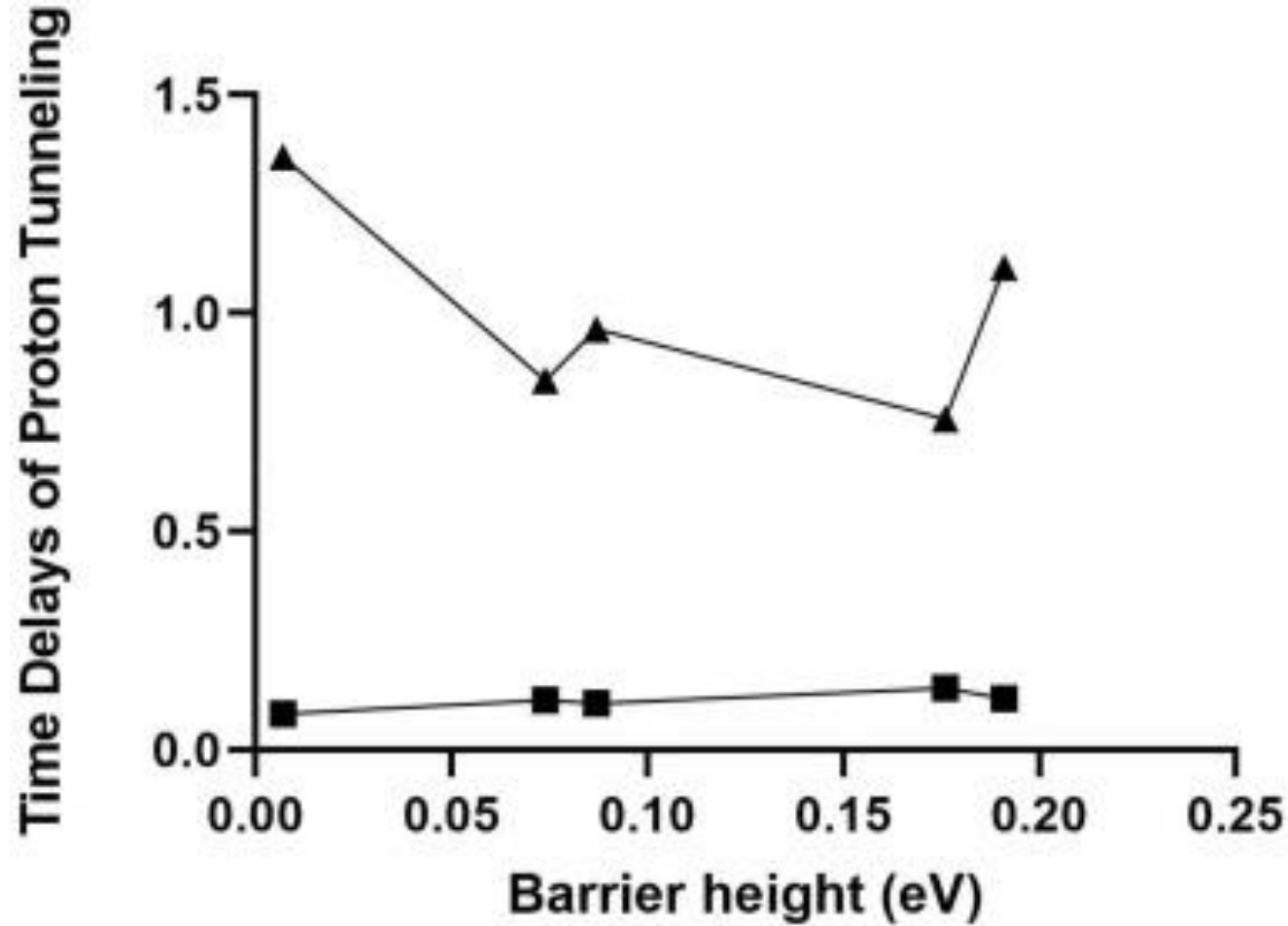
A*	—	C
T	—	G*

(P. Löwdin, Rev. Mod. Phys. 35 (1963) 724)

DNA Nokta Mutasyonu



DNA Nokta Mutasyonu



■ Entropic Time (ps)

▲ Dwell Time (fs)

- Proton tünellemesi esnasında kabaca pikosaniyelik gecikme olur..
- Bu süreler biyolojik sistemlerdeki ortalama konformasyonel değişim zamanına yakındır.
- Tünelleme esnasındaki gecikme mutasyonların oluşması için yeterli olabilir.

ETT = Entropik Tünelleme Zamanı

(G. Çelebi, E. Özçelik, E. Vardar, DD, Prog. Biophysics and Molecular Biology, 2021)

(E. Özçelik, E. Akar, S. Zaman, DD, Prog. Biophysics and Molecular Biology, 2022)

SONUÇLAR

- Tünelleme fiziksel, kimyasal, biyolojik ve teknolojik bir çok olayın altında yatan nedendir. Oldukça yaygındır.
- Tünelleme zamanı gelecek kuantum bilgisayarları için bir işlem hızı sınırı koyacaktır.
- Entropik tünelleme zamanı biyolojik sistemlerde anlamlı sonuçlar vermektedir.
- Entropik tünelleme zamanı sadece He iyonuzasyonu ile test edildi; daha fazla deneysel sonuç gereklidir.

Tezekkürler...