

Proton EDM Deneyi İçin
Kuadrupol ve Demet Konum Monit6r6
Prototip 6nerileri

Selçuk Hacı6merođlu

YEFİST 2022

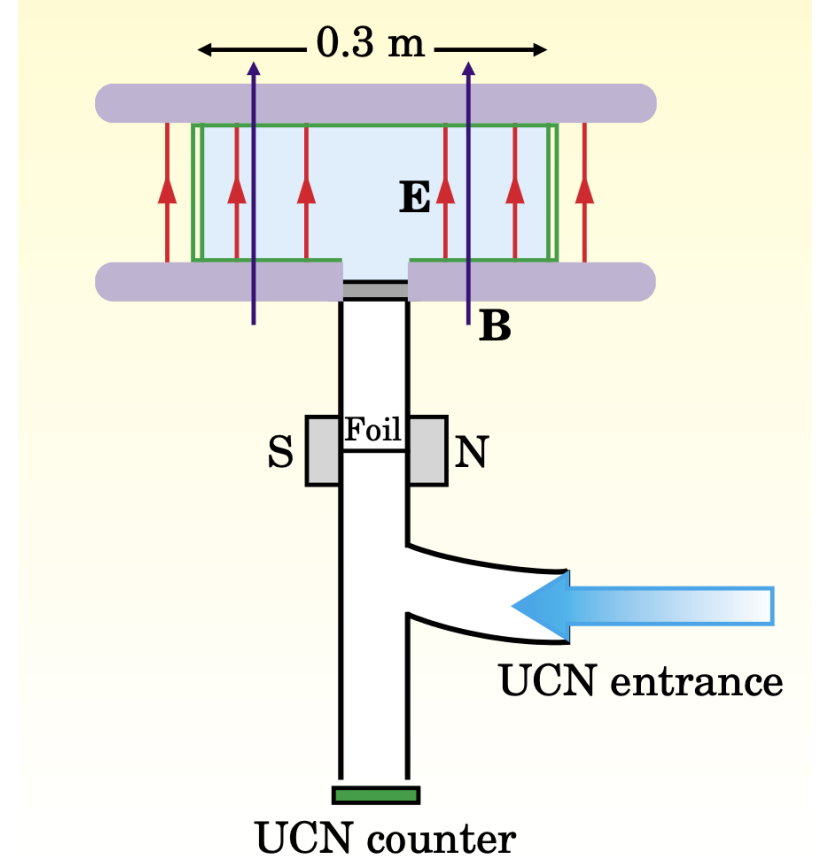
24 Eylül

Giriş

- Temel parçacıkların elektrik dipol momenti (EDM), klasik bakış açısıyla *parçacık içindeki pozitif ve negatif yük merkezlerinin arasındaki mesafenin ölçüsü* olarak düşünülebilir.
- EDM deneylerinin en büyük motivasyonu, güçlü bir **CP (Yük-Parite) ihlali** gözlemlemektir.
- Standart Model (SM) aslında **zayıf etkileşmeler** ve **QCD'deki θ parametresi** üzerinden CP ihlali tanımlıyor.
- Fakat bu süreçlerin dışında bir CP ihlali olması çok muhtemel.
- Mesela evrende bu kadar az anti-madde gözlenmesi, büyük patlamadan hemen sonra güçlü bir CP ihlali içeren bir senaryoyla açıklanabilir (Sakharov şartları).
- SM'e göre nötron ve protonun EDM değeri 10^{-32} e-cm civarında olmalı.
- Günümüz teknolojisi bu ölçümü yapmak için yeterli değil.
- Fakat standart model ötesi (SMÖ) teoriler daha yüksek değerler öngörüyor.
- Olası bir EDM ölçümü, bu senaryoları doğrulayıp yanlışlama potansiyeline sahip.
- Yukarıda bahsedilen θ_{QCD} değerinin deneysel olarak belirlenmesini de sağlayabilir.
- Bu da **axion** parçacığının varlığına işaret edebilir.

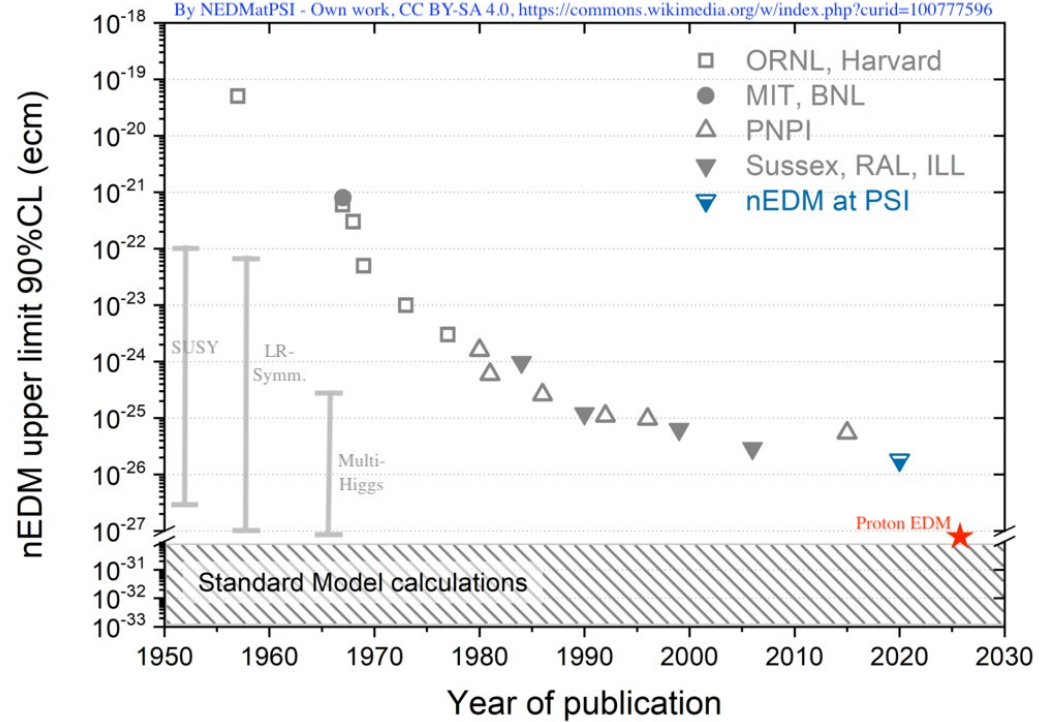
EDM deneyleri

- EDM deneyleri 1950'lerde nötron ile başladı.
- Temel prensip:
 - 1) Parçacıkların spinlerini polarize et
 - 2) Elektrik alan içinde bir süre tut
 - 3) Elektrik alandan çıkartıp spin ölçümü yap

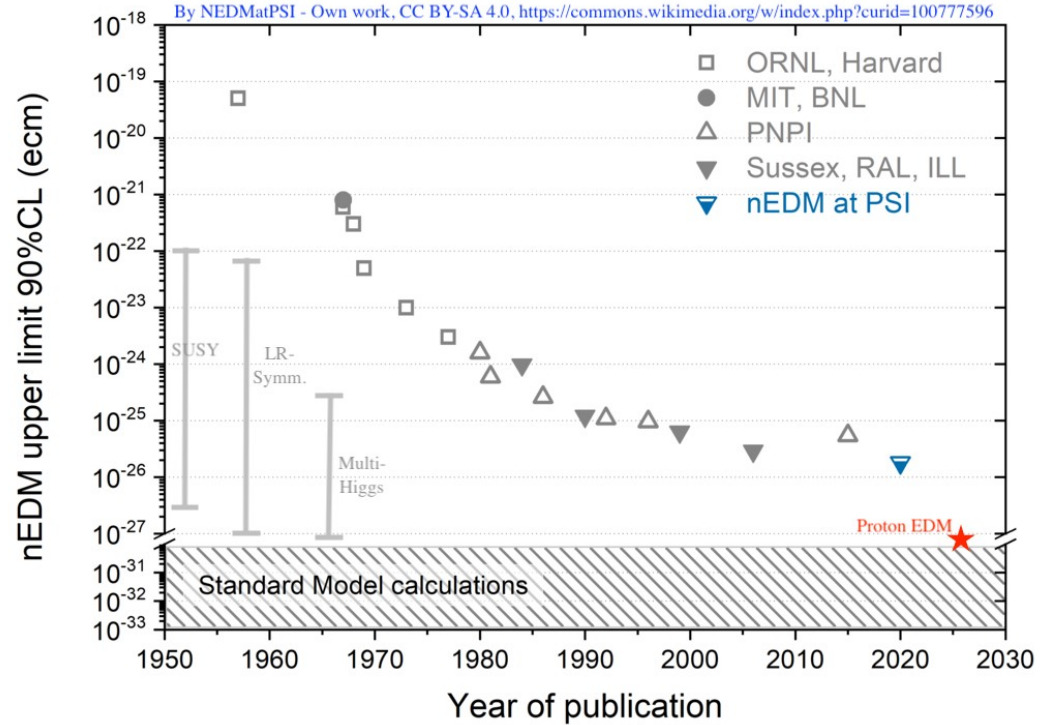
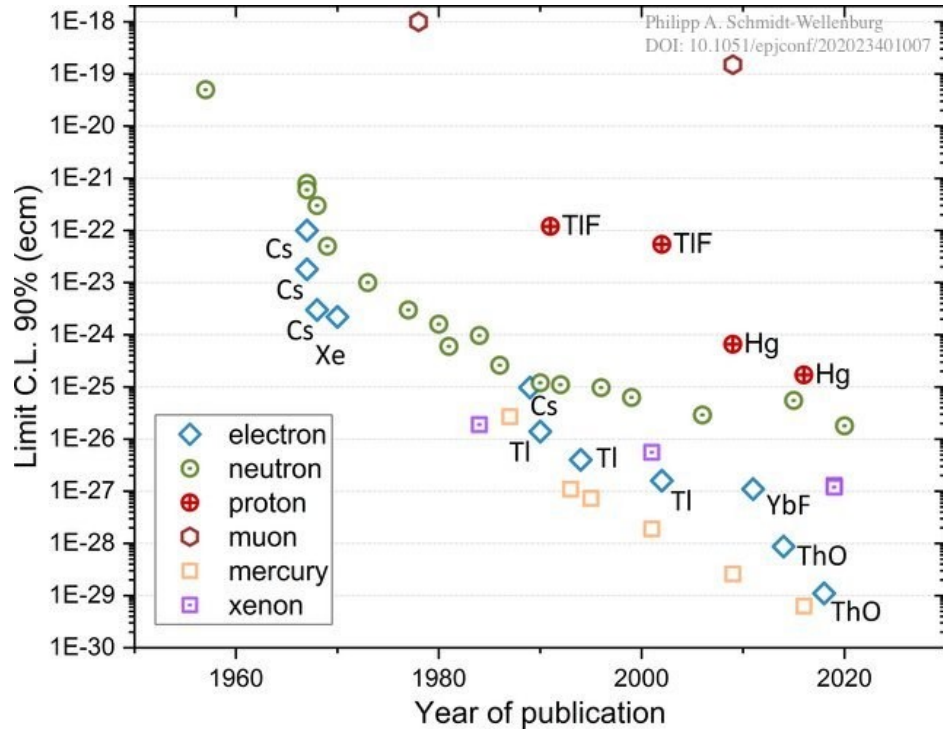


EDM deneyleri

- Aradan geçen 70 yılda onlarca deney yapıldı.
- Deneylerin hassasiyeti 7 mertebeye yakın iyileşme gösterdi.
- Henüz sıfırdan farklı bir şey ölçülemedi.
- Nötron EDM deneylerindeki en büyük iki sorun istatistik ve manyetik alan.
- Proton EDM deneyinde her iki kısıtlama da olmadığı için çok daha iyi bir hassasiyet öngörülüyor: 10^{-29} e-cm.



EDM deneyleri



Spin ve elektrik/manyetik alan arasındaki etkileşim

Durağan bir parçacığın spin değişimi

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} + \vec{d} \times \vec{E} \quad ; \quad \vec{\mu} = \frac{Gq}{2m} \vec{S} \quad ; \quad \vec{d} = \frac{\eta q}{2mc} \vec{S}$$

- Proton (*nötron*) için
- $G = 1,8$ ($0,9$) (manyetik anomali)
- $\eta < 10^{-12}$ (elektriksel anomali)
- Bu devasa farktan ötürü manyetik alan en önemli sistematik hata kaynağıdır

Saklama halkasında spin ve elektrik/manyetik alan arasındaki etkileşim

$\vec{\beta} \cdot \vec{E} = 0 \quad \vec{\beta} \cdot \vec{B} = 0$

Durağan parçacığın spinindeki değişim

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} + \vec{d} \times \vec{E},$$

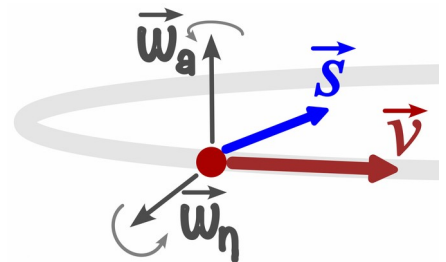
$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{S},$$

MDM kaynaklı değişim

$$\vec{\omega}_a = -\frac{q}{m} \left(G\vec{B} - \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{1}{\gamma} \left[\vec{B}_{\parallel} - \frac{1}{c\beta^2} (\vec{\beta} \times \vec{E})_{\parallel} \right] \right)$$

EDM kaynaklı değişim

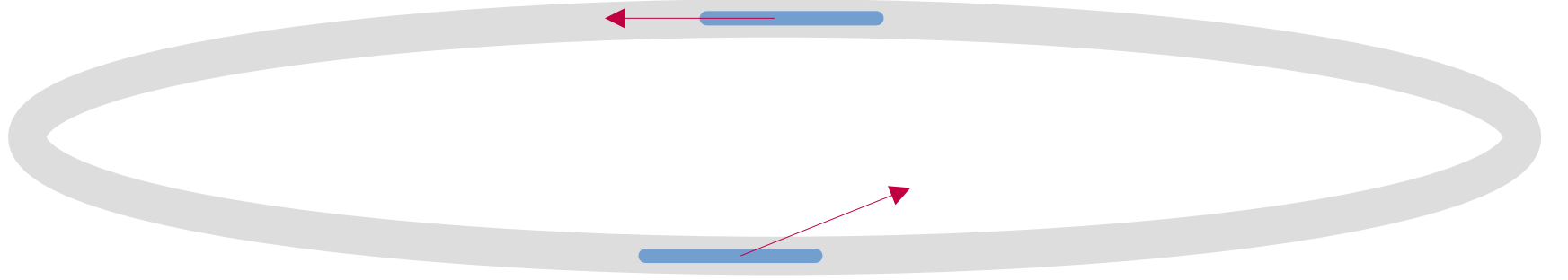
$$\vec{\omega}_\eta = -\frac{\eta q}{2m} \left(\frac{\vec{E}}{c} + \vec{\beta} \times \vec{B} \right)$$

$$\vec{\Omega} = \vec{\omega}_a + \vec{\omega}_\eta$$


- Hızlandırıcıda rölativistik etkiler ve dairesel hareket işin içine giriyor
- ω_η terimi, spinin elektrik dipol momeninden (**EDM**) kaynaklanan dönmesini ifade ediyor.
- Ölçmek istediğimiz şey bu
- ω_a terimi, spinin manyetik dipol momeninden (**MDM**) kaynaklanan dönmesini ifade ediyor.
- **Sistemik hata kaynağı**

Saklama halkasında spin ve elektrik/manyetik alan arasındaki etkileşim

t=0 anında spin polarize olmuş (momentum yönünde)



Hızlandırıcıda bir süre hareket ettikten sonra spin hem yatay hem de dikey bileşen kazanıyor

- Hızlandırıcıda rölativistik etkiler ve dairesel hareket işin içine giriyor
- ω_n terimi, spinin elektrik dipol momeninden (**EDM**) kaynaklanan dönmesini ifade ediyor.
- Ölçmek istediğimiz şey bu (**dikey bileşen**)
- ω_a terimi, spinin manyetik dipol momeninden (**MDM**) kaynaklanan dönmesini ifade ediyor.
- Sistemik hata kaynağı (**yatay bileşen**)

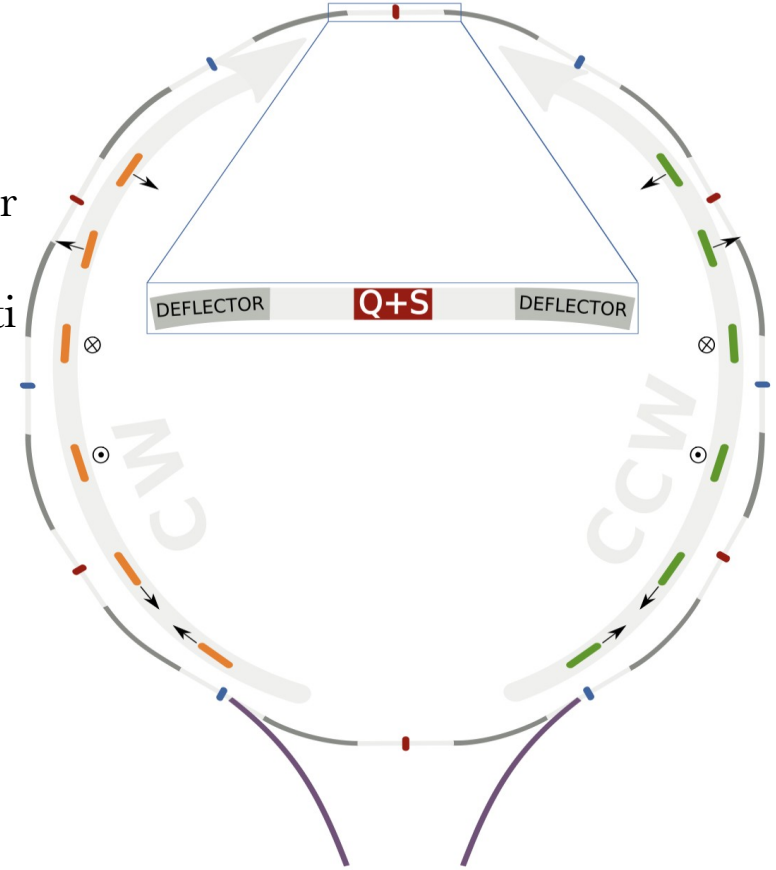
Hızlandırıcıda EDM deneylerinin avantajları

- 1) Çok daha fazla parçacık var ==> Çok daha iyi istatistik
- 2) Manyetik alanı telafi etmek çok daha kolay

Sonuç olarak, alternatiflerine göre birkaç merteye daha hassas ölçüm yapmak mümkün.

Proton EDM deneyinin tasarımı

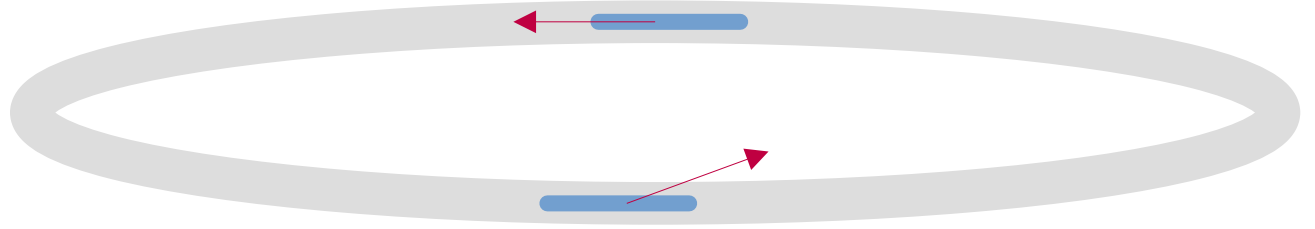
- 1) Radyal yöndeki elektrik alan ve manyetik kuadrupollar demeti saklama halkasında (SH) tutacak
- 2) SH'a birbirinin içinden geçecek olan iki proton demeti gönderilecek
- 3) Buketlerin hepsi momentum yönünde polarize olmayacak (bazıları sistematik hatalar, bazıları da karanlık madde/karanlık enerji araştırması için dikey yönde polarize olacak)
- 4) Demetler yavaş yavaş çekilip 10^3 saniye sonunda spin ölçümleri bitmiş olacak



Spin kontrolüne bir örnek

Parçacığın maruz kaldığı manyetik alan sıfır kabul edilirse, ω_a şu hale gelir:

$$\vec{\omega}_a = -\frac{q}{m} \left[\left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} - \frac{1}{\gamma c \beta^2} (\vec{\beta} \times \vec{E})_{\parallel} \right]$$



Sihirli momentum

Özel bir momentum değerinde ($p=0,7007 \text{ GeV}/c$), parantez içindeki birinci terim ($G - 1/(\gamma^2-1) \dots$) sıfırlanır.

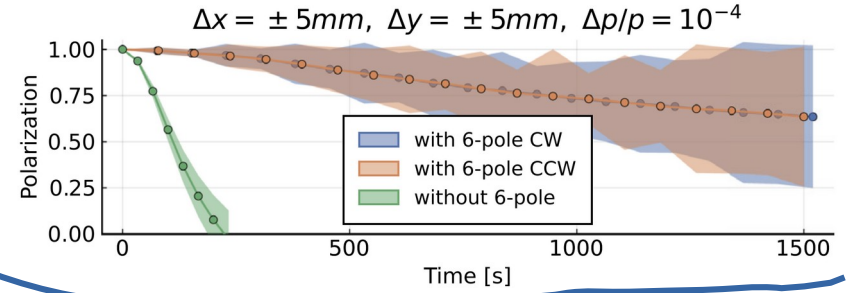
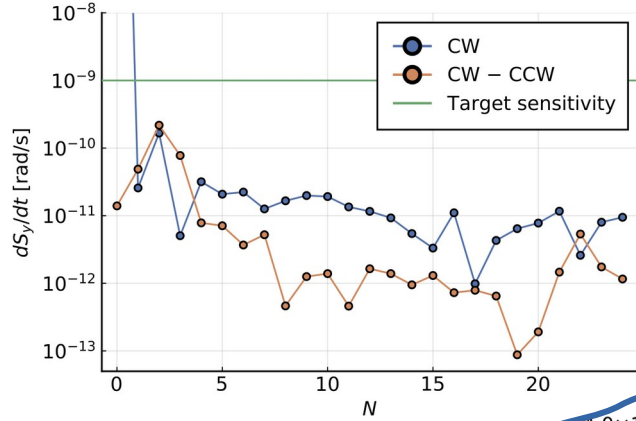
Böylece spin, yatay doğrultuda momentum yönünde kilitlenir. Ancak ikinci terimden ($1/\gamma c \beta^2 \dots$) ötürü dikey doğrultuda EDM benzeri bir sistematik hata oluşabilir.

Proton EDM deneyinde sistematik hatalar ve simetriler

- Proton EDM deneyinde bilinen olası tüm sistematik hatalar incelendi.
- Çoğu sistematik hata, sisteme simetri katılarak çözüldü:
 1. Birbirinin içinden geçen demetler
 2. Zıt yönlerde polarize edilmiş buketler
 3. Kuadrupol polaritelerinin her saklama sonra tersine çevrilmesi
 4. Örgünün olabildiğince simetrik hale getirilmesi
- Kalan sistematik hatalar ise ek ölçümlerle sıfırlanacak:
- Radyal manyetik alanı ölçüp sıfırlamak için *kuadrupol modülasyonu + demet konum monitörleri + Helmholtz bobinleri* kullanılacak.
- Spinin yatay bileşeninin büyümemesi için sekstupollar kullanılacak
- Radyal yöndeki manyetik alanı kasıtlı olarak büyültüp spindeki değişime bakarak örgüdeki elektriksel odaklama sıfırlanacak
- vs.

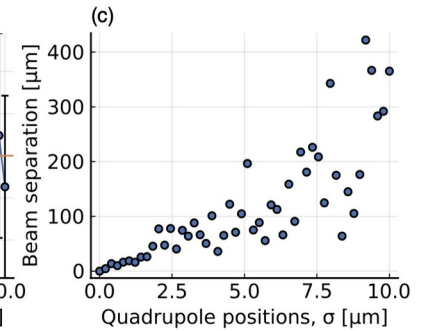
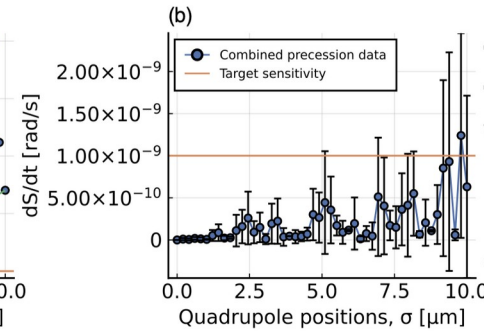
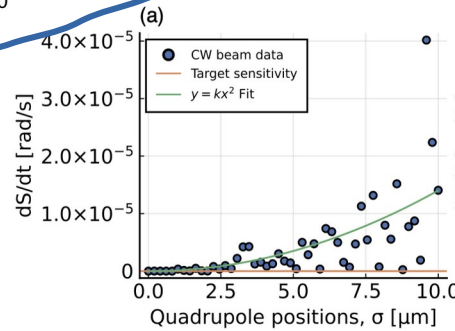
Proton EDM deneyinde sistematik hatalar ve simetrliler

Yatay spin bileşeninin sekstupollar ile kontrol altına alınması



10 V/m dikey elektrik alanının DC bileşeninin sebep olduğu sistematik hatayı yok etmek için birbirinin içinden geçen demetler kullanmak gerekiyor.







Kuadrupollardaki konum sapmasının spine ve demetler arasındaki mesafeye etkisi



Proton EDM deneyinde sistematik hatalar ve simetriler

PHYSICAL REVIEW D **105**, 032001 (2022)

Comprehensive symmetric-hybrid ring design for a proton EDM experiment at below $10^{-29} \text{e} \cdot \text{cm}$

Zhanibek Omarov ^{1,2} Hooman Davoudiasl,³ Selcuk Hacıömeroğlu ^{2,*} Valeri Lebedev ⁴ William M. Morse,⁵ Yannis K. Semertzidis ^{2,1,†} Alexander J. Silenko,^{6,7,8} Edward J. Stephenson ⁹ and Riad Suleiman ¹⁰

REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS **87**, 115116 (2016)

A storage ring experiment to detect a proton electric dipole moment

V. Anastassopoulos,¹ S. Andrianov,² R. Baartman,³ S. Baessler,⁴ M. Bai,⁵ J. Benante,⁶ M. Berz,⁷ M. Blaskiewicz,⁶ T. Bowcock,⁸ K. Brown,⁶ B. Casey,⁹ M. Conte,¹⁰ J. D. Crnkovic,⁶ N. D'Imperio,⁶ G. Fanourakis,¹¹ A. Fedotov,⁶ P. Fierlinger,¹² W. Fischer,⁶ M. O. Gaisser,¹³ Y. Giomataris,¹⁴ M. Grosse-Perdekamp,¹⁵ G. Guidoboni,¹⁶ S. Hacıömeroğlu,¹³ G. Hoffstaetter,¹⁷ H. Huang,⁶ M. Incagli,¹⁸ A. Ivanov,² D. Kawall,¹⁹ Y. I. Kim,¹³ B. King,⁸ I. A. Koop,²⁰ D. M. Lazarus,⁶ V. Lebedev,⁹ M. J. Lee,¹³ S. Lee,¹³ Y. H. Lee,²¹ A. Lehrach,^{5,22} P. Lenisa,¹⁶ P. Levi Sandri,²³ A. U. Luccio,⁶ A. Lyapin,²⁴ W. MacKay,⁶ R. Maier,⁵ K. Makino,⁷ N. Malitsky,⁶ W. J. Marciano,⁶ W. Meng,⁶ F. Meot,⁶ E. M. Metodiev,^{13,25} L. Miceli,¹³ D. Moricciani,²⁶ W. M. Morse,⁶ S. Nagaitsev,⁹ S. K. Nayak,⁶ Y. F. Orlov,¹⁷ C. S. Ozben,²⁷ S. T. Park,¹³ A. Pellegrino,¹⁶ E. Petrokev,¹³ P. Pile,⁶ P. Poddebergh,⁶ V. Polubronskoy,⁶

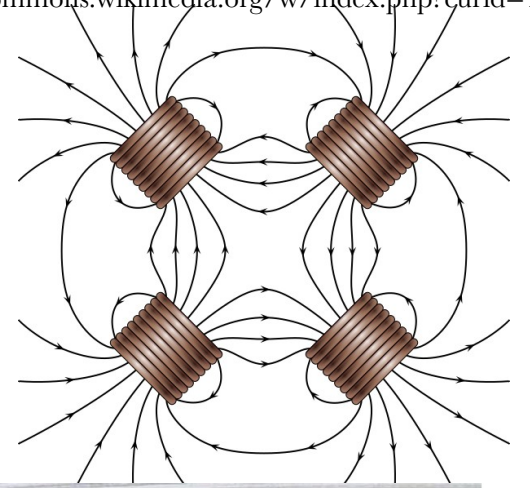
Manyetik kuadrupollar

By Geek3 - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11117039>

- Demeti kuadrupolun merkezinden geçecek şekilde odaklamak üzere tasarlanır.
- Bunun için 4 adet bobin kullanılır.
- x-yönünde odaklayan bir kuadrupolun içinden geçen demet üzerindeki kuvvet şu şekildedir:

$$F_x = -kx \quad ; \quad F_y = +ky$$

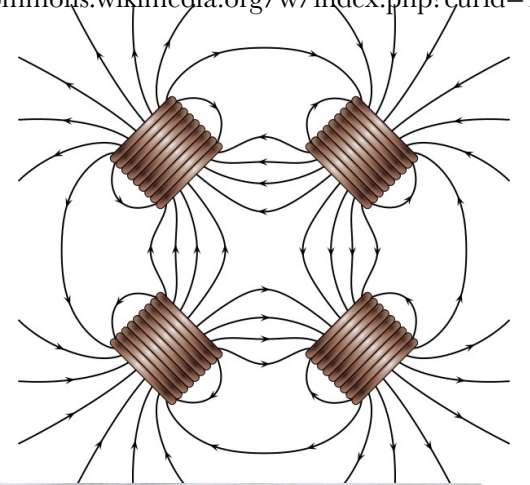
- Burada k , odaklama gücüdür (*focusing strength*).
- Demet bir yönde odaklanırken, diğer yönde merkezden uzaklaşır.
- Pratikte kuadrupollarda üst mertebeden *multipole* bileşenleri de olur.



Manyetik kuadrupollar

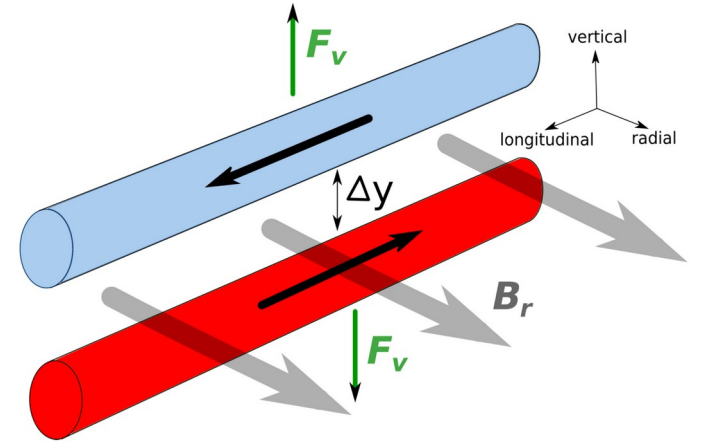
By Geek3 - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11117039>

- Bizim prototipimizde ferromanyetik çekirdek bulunmayacak
- k sabiti 0,2 T/m civarında olacak. 100 sarım için 5 Amper'e karşılık geliyor
- Sekstupol bileşeni 20 mT/m²'den az olacak.
- Kuadrupol merkezi polarite terslenmesinden sonra en fazla 10 μ m kadar değişecek.
- Elektronığı 10³ saniye boyunca yüzde 0,3'e kadar stabil olacak
- Akım yüzde 0,1 seviyesinde 1-10 kHz arasında bir frekansta modüle edilecek
- Projenin elektronik kısmı İTÜ'de kuadrupolların tasarımı, üretimi ve alan ölçümleri İSÜ'de yapılacaktır.



Demet konum monitörleri (DKM)

- Aslında demet konumundan ziyade karşılıklı yönlerden gelen demetler arasındaki mesafeyi ölçecek.
- Çalışma prensibi şu şekilde:
 - 1) Radyal yöndeki manyetik alan (B_r) demetler arasında Δy kadar bir mesafeye yol açar. Biz bu mesafenin $100 \mu\text{m}$ 'den daha az olmasını istiyoruz.
 - 2) Bu mesafeyi DKM ile ölçeceğiz.
 - 3) Ölçüm sonucunu sıfırlamak üzere Helmholtz bobinleri ile ters yönde manyetik alan uygulayacağız.



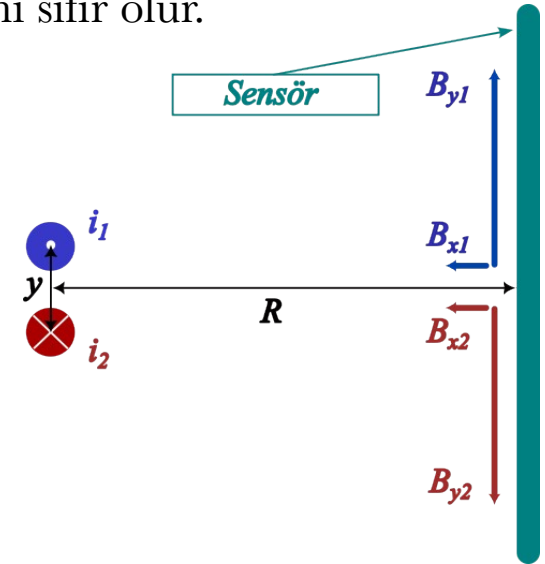
Demet konum monitörleri (DKM)

- Her bir demet yatay olarak belli bir uzaklıkta (2 cm gibi) bulunan sensör üzerinde manyetik alan indükler.
- Eğer iki demet eşit akıma sahipse bu manyetik alanın dikey bileşeni sıfır olur.
- Yatay bileşeni de aralarındaki dikey mesafe ile orantılıdır:

$$B_x(f_m) = 2 \cdot \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \frac{\Delta y}{R} A \sin(2\pi f_m)$$

- A: modülasyon katsayısı (0,01)
- I : demetlerin akımı (2 mA)
- R: demetlerle sensör arasındaki yatay mesafe (2 cm)
- Δy : demetler arasındaki dikey mesafe (100 μm)
- f_m : modülasyon frekansı (1-10 kHz arası)

- Sayısal değerler yerine koyulduğunda $B_x = 2 \text{ pT}$ genlikli olduğu görülür.



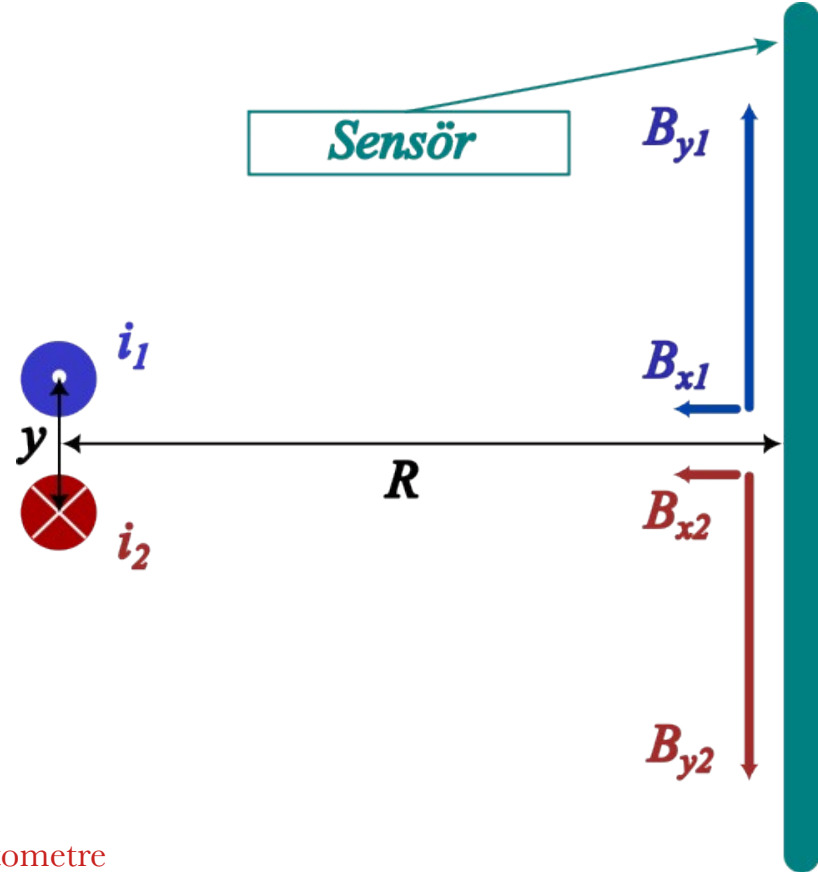
Demet konum monitörleri (DKM)

- BPM'de kullanılacak sensöre kesin bir karar verilmedi.
- Fluxgate manyetometreleri makul bir çözüm gibi görünüyor: Ticari olarak $\sim 10 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ hassasiyette bulunabiliyor.
- Halka boyunca 48 adet DKM kullanılırsa her bir saklamada (10^3 saniye)

$$\frac{10 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}}{\sqrt{48} \times \sqrt{10^3}} \approx 45 \text{ fT} \Rightarrow < 2,5 \text{ } \mu\text{m}$$

hassasiyette ölçüm yapılabilir.

Alternatif olarak birkaç nT hassasiyete sahip fluxgate manyetometre çipleri ile maliyet ciddi oranda düşürülebilir.



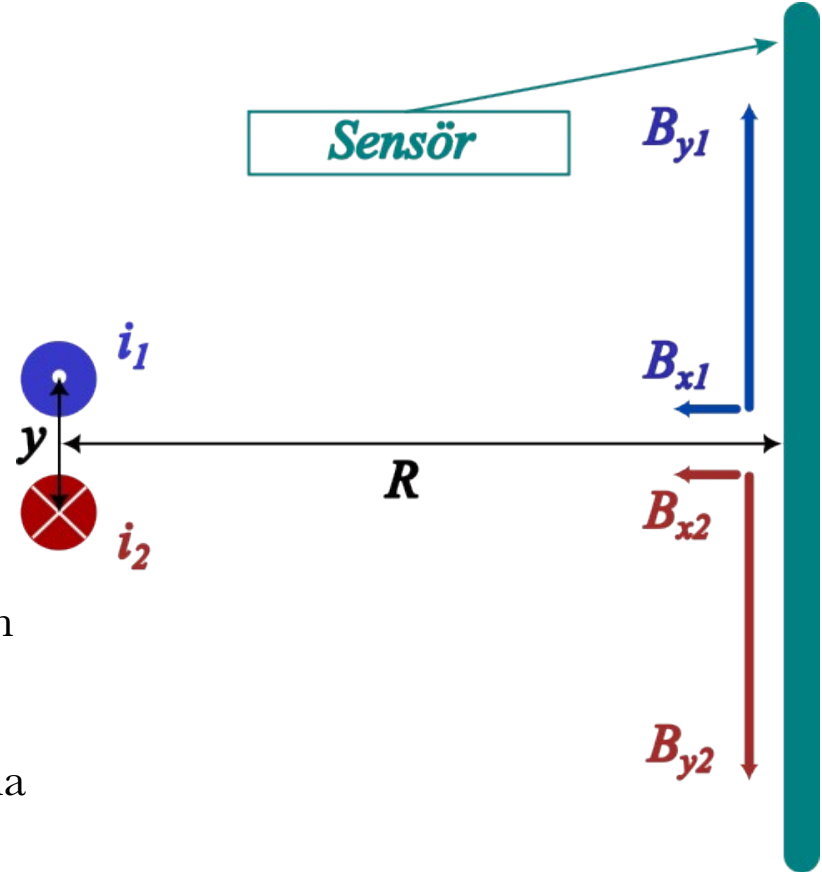
Demet konum monitörleri (DKM)

- Demetler arasındaki dikey mesafenin maksimum 4 cm olması bekleniyor.
- Bu durumda aynı formülden

$$B_x^{max} = 2 \text{ pT} \times \frac{4 \text{ cm}}{100 \mu \text{ m}} = 800 \text{ pT}$$

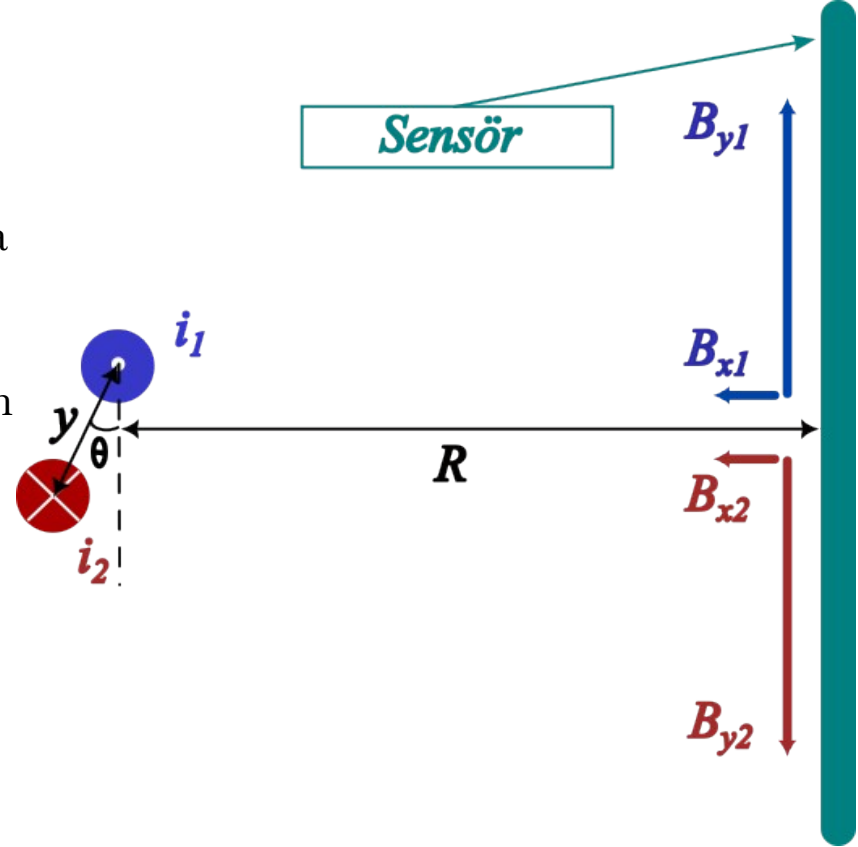
elde edilir.

- Tipik bir fluxgate manyetometresi 100 μT 'nin üzerinde doyum seviyesine varıyor.
- Büyük ihtimalle hafif bir manyetik kalkanlama yetecektir.



Demet konum monitörleri (DKM)

- Nihai olarak DKM mutlak konumdan ziyade demetler arasındaki dikey mesafeyi ölçecek ve Helmholtz bobinleri ile bu mesafe sıfırlanmaya çalışılacak.
- Hesaplamalarımıza göre bu yüzden demetlerin DKM'ye göre aynı hizada olmaması önemli bir sorun teşkil etmiyor.
- Benzer şekilde demetlerin sensörün dikey merkezinden yukarıda/aşağıda olması da, sensörün biraz eğik bir şekilde yerleştirilmesi de önemli bir soruna yol açmıyor.



Özet

- Önümüzdeki yıllarda yapılması planlanan Proton EDM deneyi, SM ötesi teorilerin testinde önemli bir rol oynayabilir.
- BNL tarafından talep edilen teknik rapor için manyetik kuadrupol ve demet konum monitörü prototipleri geliştirmeyi planlıyoruz.
- 5 ay içerisinde deneyin gereksinimleri doğrultusunda bu projeler için teknik verileri sağlayacağız (manyetik alan stabilitesi, yüksek mertebeli çok kutup bileşenleri, ölçüm hassasiyeti vb. ile ilgili beklentilerimiz)
- Büyük ihtimalle 3 yıl içinde hızlandırıcının inşasına başlanacak.