

* SİZCE NEDİR?

Kullananın gözyaşlarındaki proteinleri çekip karmaşık molekülleri doğrudan merceklerle kattıkları için yumuşak kontak (değen) merceklerin kullanımı rahattır. Bunlar bir anlamda kullanıcının bir parçası olurlar. Bazı mak-
yaj türlerinde deriye tutunması için aynı çekici kuvvetten yararlanılır. Bu kuvvetin doğası nedir? (Charles D. Winters)



b ö l ü m

23

Elektrik Alanları

Bölüm İçeriği

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 23.1 Elektrik Yüklerinin Özellikleri | 23.5 Sürekli bir Yük Dağılımının Elektrik Alanı |
| 23.2 Yalıtkanlar ve İletkenler | 23.6 Elektrik Alan Çizgileri |
| 23.3 Coulomb Yasası | 23.7 Düzgün bir Elektrik Alanında Yüklü Parçacıkların Hareketi |
| 23.4 Elektrik Alanı | |

Yüklü parçacıklar arasındaki elektromanyetik kuvvet, doğanın temel kuvvetlerinden biridir. Bu bölüme, elektromanyetik kuvvetlerin başlıca özellikleri anlatılarak başlanacak, sonra, herhangi iki yüklü parçacık arasındaki temel kuvvet yasası olan Coulomb yasası tartışılacaktır. Ardından, bir yük dağılımı ile ilişkili elektrik alan kavramı sunulup öteki yüklü parçacıklar üzerindeki etkisi anlatılacaktır. Belli bir yük dağılımının elektrik alanının Coulomb yasasından nasıl hesaplanacağı gösterilecektir. Yüklü bir parçacığın düzgün bir elektrik alandaki hareketinin anlatımı ile bölüm bitirilecektir.

23.1 ELEKTRİK YÜKLERİNİN ÖZELLİKLERİ

Elektrik yükleri ve kuvvetlerinin varlığını göstermek için birkaç basit deney yapılabilir. Örneğin, saçınızı kuru bir günde taradıktan sonra, tarağın kâğıt parçalarını çektiğini göreceksiniz. Çekim kuvveti çoğu kez kâğıt parçalarını düştürmeyecek kadar kuvvetlidir. İpek ya da kürke sürtülmüş cam veya lâstik gibi başka maddelerle de aynı olay gözlenebilir.

Bir başka basit deney, şişirilmiş bir balonun yünle ovulmasıdır. Bu durumda balon odanın duvarı veya tavanına saatlerce yapışık kalabilir. Böyle davranan cisimlerin *elektriklenmiş* veya **elektrikle yüklenmiş** oldukları söylenir. Ayakkabılarınızı yün bir halıya iyice sürterek, vücudunuzu kolayca elektrikleyebilirsiniz. Bir arkadaşınıza hafifçe dokunarak (ve onu korkutarak) vücudunuzdaki bu yükü hissedip ondan kurtulabilirsiniz. Uygun koşullarda birbirine böyle dokunulduğunda bir kıvılcım görülür ve her iki taraf da hafif bir karıncalanma hisseder. (Havadaki aşırı nem vücudunuzda biriken yükün toprağa kaçmasına yol açacağından, bu tür deneyler kuru havalarda en iyi sonuç verirler.)

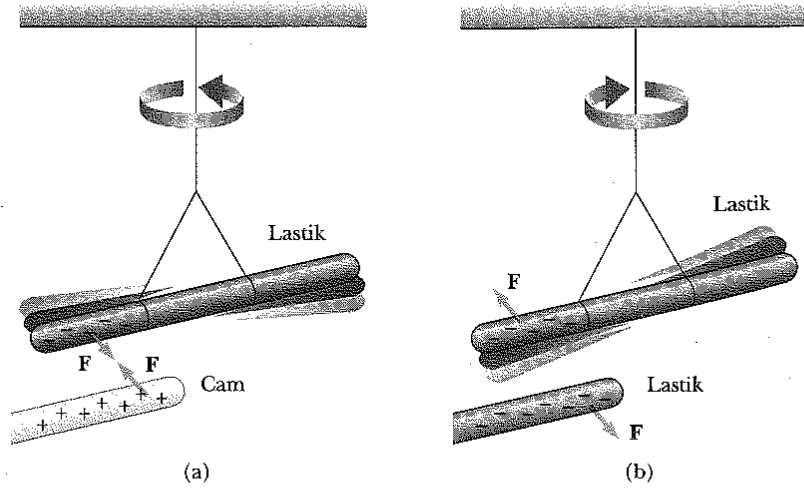
Bir dizi basit deneylerle, Benjamin Franklin'in (1706-1790) **artı (pozitif)** ve **eksi (negatif)** adlar verdiği iki çeşit elektrik yükü olduğu bulunmuştur. Bunu göstermek üzere, kürke sürtüldükten sonra metal olmayan bir iple Şekil 23.1'deki gibi asılmış sert bir lâstik çubuğu göz önüne alalım. İpeğe sürtülmüş bir cam çubuk lâstik çubuğa yaklaştırıldığında, ikisi birbirlerini çekerler (Şekil 23.1a). Öte yandan, yüklü iki lâstik çubuk (veya yüklü iki cam çubuk) birbirlerine yaklaştırıldığında, Şekil 23.1b'deki gibi birbirlerini iterler. Bu gözlemden lâstik ve camın, farklı iki elektriklenme durumunda bulundukları görülmektedir. Bu gözlemlere dayanarak, **aynı yüklerin birbirlerini ittikleri, farklı yüklerin birbirlerini çektikleri** sonucuna varılır.

Franklin'in önerisi benimsenerek cam çubuktaki elektrik yüküne **artı**, lâstik çubuktakine **eksi** denilir. Bu nedenle yüklü bir lâstik çubuk tarafından çekilen (veya yüklü bir cam çubuk tarafından itilen) yüklü herhangi bir cisim **artı** yüklü, yüklü bir lâstik çubuk tarafından itilen (veya yüklü bir cam çubuk tarafından çekilen) yüklü herhangi bir cisim **eksi** yüklü olmalıdır.

Birçok ticarî ürünün özelliklerinden, çekici elektrik kuvvetleri sorumludur. Örneğin birçok kontak merceğin plâstığı (etafilkon), gözyaşındaki proteinin moleküllerini elektrikselsel olarak çeken moleküllerden oluşur. Bu protein moleküllerinin plâstikçe soğrulup tutulması ile mercek kullanıcının gözyaşlarından oluşmuş durumuna girer. Bundan dolayı kullanıcının gözü merceği yabancı cisim gibi algılamaz ve böylece rahatça kullanılabilir. Kozmetiklerin çoğunda bulunan maddeler deri ya da saç tarafından böyle elektrik kuvvetleri ile çekilme özellikleri nedeniyle, boya ya da başka kimyasal maddeler bir kez uygulandıktan sonra orada kalırlar.

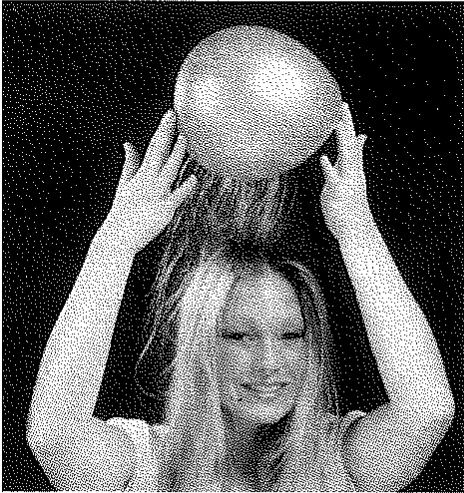
Ev Deneyi

Şişirilmiş bir balonu saçınıza sürttükten sonra, bir musluktan akan ince bir su demeti yakınında tutunuz. Ne olur? (Sürtülmüş plâstik bir dolmakalem ya da tarak da aynı işi görür).



Şekil 23.1 (a) Bir ipe asılmış eksi yüklü bir lastik çubuk, artı yüklü bir cam çubuğa doğru çekilir. (b) Eksi yüklü bir lastik çubuk, eksi yüklü başka bir lastik çubuk tarafından itilir.

Yük korunur



Şekil 23.2 Kuru bir günde bir balonu saçınıza sürterseniz, balon ve saçınız yüklenir. (Charles D. Winters).

Yük kuantumludur

Franklin'in elektrik modelinin bir başka önemli yanı, **elektrik yükünün daima korunuyor olmasıdır**. Yani, bir cisim bir başkasına sürtüldüğünde bu süreçte yük oluşmaz. Elektriklenme durumu yükün bir cisimden ötekine geçmesiyle meydana gelir. Böylece, cisimlerden biri bir miktar eksi yük kazanırken ötekisi aynı miktar artı yük kazanır. Örneğin, bir cam çubuk ipeğe sürtüldüğünde, ipek, cam çubuktaki artı yüke eşit miktarda eksi yük kazanır. Atom yapısı hakkındaki bugünkü bilgilerden, sürtünmeyle camdan ipeğe geçenlerin eksi yüklü elektronlar olduğu bilinmektedir. Benzer biçimde, lastik, kürke sürtüldüğünde, elektronlar kürkten lastiğe geçerek lastiğe net bir eksi yük, kürke de net bir artı yük kazandırır. Bu süreç nötr, yüklenmemiş maddede, artı yükler (atom çekirdeklerindeki protonlar) kadar eksi yüklerin (elektronlar) bulunması olgusu ile uyur.

Sinama Sorusu 23.1

Şişirilmiş bir balonu saçınıza sürterseniz Şekil 23.2'deki gibi ikisinin birbirlerini çektikleri görülür. Sürtmeyen sonra balon ve saçınızdaki yük miktarı sürtmeyen öncekine göre (a) az mıdır?, (b) aynı mıdır?, (c) daha çok mudur?

Robert Millikan (1868-1953), 1909 da, elektrik yükünün, her zaman, bir temel e yük biriminin tam katları halinde bulunduğunu keşfetti. Modern anlatımla, q yükünün **kuantumlanmış** olduğu söylenir. Yani, elektrik yükü kesikli "paketlerden" oluşur. Buna göre, N tam sayı olmak üzere, $q = Ne$ yazılabilir. Aynı dönemde yapılan başka deneyler, elektronun $-e$ yükünde, protonun ise buna eşit fakat zıt işaretli $+e$ yükünde olduğunu göstermiştir. Nötron gibi bazı parçacıkların yükü bulunmaz. Nötr bir atomda protonlar kadar elektronlar bulunmalıdır.

Yük korunumlu bir nicelik olduğundan kapalı bir bölgedeki net yük aynı kalır. Bir süreçte yüklü parçacıklar oluşturulursa, bu yükler her zaman zıt işaretli eşit büyüklüklü çiftler olarak ortaya çıkarlar.

Şimdiye kadarki anlatımlardan, elektrik yükünün aşağıdaki önemli özellikleri olduğu sonucu çıkarılır:

- Doğada iki tür yük bulunur. Benzer olanlar birbirlerini iterler, farklı olanlar ise birbirlerini çekerler.
- Yük korunumludur.
- Yük kuantumludur.

Elektrik yükünün özellikleri

23.2 YALITKANLAR VE İLETKENLER

11.3 Maddeler, elektrik yükünü iletme yeteneklerine göre sınıflandırılırlar.

Elektriksel **iletkenler**, elektrik yüklerinin içinde özgürce hareket ettikleri, **yalıtkanlar** ise edemedikleri maddelerdir.

Cam, lâstik gibi maddeler elektriksel yalıtkan sınıfına girerler. Bu tür maddeler sürtülerek yüklendiklerinde, yalnızca sürtünen bölgeleri yüklenir ve bu yük maddenin başka taraflarına geçemez.

Buna karşın, bakır, alüminyum ve gümüş gibi maddeler iyi elektriksel iletkenlerdir. Bu maddelerin küçük bir bölgesi yüklenildiğinde, yük iletkenin tüm yüzeyine çabukça dağılır. Bir bakır çubuk elde tutulup yün veya kürke sürülürse küçük bir kâğıt parçasını çekmediği görülür. Buna göre metalin yüklenemeyeceği sanılır. Öte yandan, bakır çubuğa tahta bir sap takılıp saptan tutularak sürtüldüğünde çubuk yüklenerek kâğıt parçasını çeker. Bunun açıklaması, yalıtkan tahta olmadığında, sürtmeyle oluşan elektrik yüklerinin bakırdan vücuda oradan da toprağa geçmesi şeklinde yapılır. Yalıtkan tahta sap, yükün ele geçmesini önler.

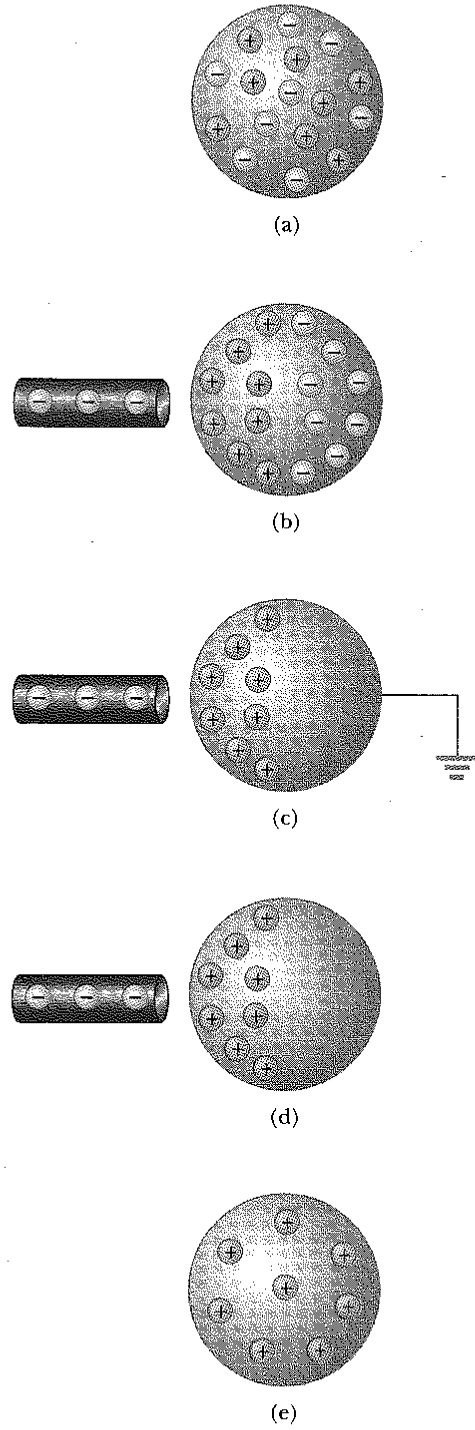
Metaller iyi iletkenlerdir

Yarıiletkenler, elektriksel özellikleri yalıtkanlarla iletkenler arasında bir yerde bulunan üçüncü bir madde sınıfıdır. Silisyum ve germanyum, transistör ve ışık veren diyot gibi çeşitli elektronik aygıtların üretiminde sıkça kullanılan yarıiletkenlerin iyi bilinen örnekleridir. Yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri, malzemelere istenilen miktarlarda belli yabancı atomlar katılarak büyük oranda değiştirilebilir.

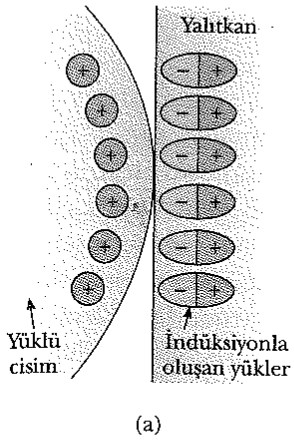
Bir iletken, iletken bir tel veya bakır boruyla toprağa bağlanırsa, **topraklandığı** söylenir. O zaman toprak, elektronların kolayca gidebileceği sonsuz bir "gider" olarak düşünülebilir. Bu göz önünde tutularak bir iletkenin **indüksiyon** denilen bir işlemle nasıl yüklenebileceği anlaşılabilir.

İndüksiyonu anlamak için, Şekil 23.3a'daki gibi topraktan yalıtılmış iletken nötr (yüklenmemiş) bir küre gözönüne alınsın. Bu küre yakınına eksi yüklü lastik bir çubuk yaklaştırıldığında kürenin çubuğa yakın bölgesi artı yük fazlalığı kazanırken, uzak bölgesi aynı miktarda eksi yük fazlalığı kazanır. (Yani, kürenin çubuğa yakın kısmındaki elektronlar kürenin öbür yanına geçerler. Çubuk küreye değmese de bu gerçekleşir.) Küre iletken bir telle toprağa bağlanarak aynı deney yapılırsa (Şek. 23.3c) iletkendeki bazı elektronlar çubuktaki eksi yük tarafından itileceklerinden bunlar toprak teli üzerinden toprağa akarlar. Toprak bağlantılı tel kaldırılınca (Şek. 23.3d) iletken kürede **indüksiyonla** artı bir yük fazlalığı oluşur. Lâstik çubuk küreden uzaklaştırıldığında (Şek. 23.3e), indüksiyonla oluşan artı yük topraklanmamış kürede kalır. Unutmayalım ki benzer yükler arasındaki itme kuvvetlerinden dolayı kürede kalan

İndüksiyonla yükleme



Şekil 23.3 Metal bir cismin *indüksiyonla* elektrik yüklenmesi (yani, iki cisim birbirlerine hiç değmezler). (a) Eşit sayıda artı ve eksi yüklü nötr metalik bir küre. (b) Nötr metal küre yakınına yüklü lastik bir çubuk konulduğunda, küre üzerindeki yük dağılımı yeniden düzenlenir. (c) Küre topraklandığında elektronlarından bir kısmı toprak teli üzerinden ayrılır. (d) Topraklama kaldırıldığında, kürede düzgün olmayan bir artı yük dağılımı bulunur. (e) Lastik çubuk uzaklaştırıldığında fazla artı yük küre yüzeyine düzgün dağılır.



(a)



(b)

Şekil 23.4 (a) Soldaki yüklü cisim, sağdaki yalıtkanın yüzeyinde indüksiyonla yükler oluşturur. (b) Kağıtta yükler yer değiştirdiği için yüklü bir tarak kağıt parçalarını çeker. © 1968 Temel fotoğrafları.

Ev Deneyi

Çok küçük parçalar halinde biraz kağıt yırtın. Saçınızı tarayın ve tarağı bu kağıt parçalarına yaklaştırın, tarağa doğru çekildiklerine dikkat edin. Kağıt parçalarına uygulanan kütle-çekiminin büyüklüğünü elektrik kuvvetlerinin büyüklüğü ile kıyaslasanız nasıldır? Gözleme devam ederseniz kağıt parçalarının taraktan uzaklaşmalarını görebilirsiniz. Tam olarak, çekilmezler uzaklaştırılır, itilirler. Bunun sebebi nedir?

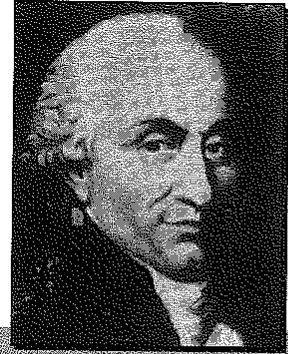
yük, küre yüzeyine düzgün olarak dağılır. Bu işlem sırasında elektriklenmiş lastik çubuk eksi yükünden hiç bir kayba uğramaz.

İndüksiyonla yüklemeye cisimlerin değmesine gerek yoktur. Bu, iki cismin değmesini gerektiren sürtme ile elektrik yüklemesi (yani *iletimle* elektrik yüklemesi) yapılmasından farklıdır.

İletkenlerdeki indüksiyonla elektrik yüklemesinin benzeri, yalıtkanlarda da görülür. Nötr moleküllerin çoğunda, artı ve eksi yük merkezleri çakışır. Oysa, yüklü bir cismin etkisinde, yalıtkanın her molekülündeki bu yük merkezleri hafifçe kayarak molekülün bir yanının diğerinden daha artı yüklenmesine yol açarlar. **Kutuplanma** denilen bu olay Bölüm 26 da daha iyi biçimde ele alınacaktır. Moleküllerdeki yüklerin bu şekilde yeniden düzenlenişi, Şekil 23.4'teki gibi, yalıtkanın yüzeyinde bir indüksiyon yükü oluşturur. Yalıtkanlardaki indüksiyonun bilinmesi ile saçta sürtülen tarağın nötr kâğıt parçalarını neden çektiği veya elbiseye sürtülen balonun nötr bir duvara niçin yapıştığı açıklanabilir.

Sınama Sorusu 23.2

A cismi B cisminin çekiliyor. B cisminin artı yüklü olduğu biliniyorsa A cismi için ne söylenebilir? (a) Artı yüklüdür. (b) Eksi yüklüdür. (c) Elektrikçe nötrdür. (d) Yanıtlamak için yeterli bilgi bulunmuyor.

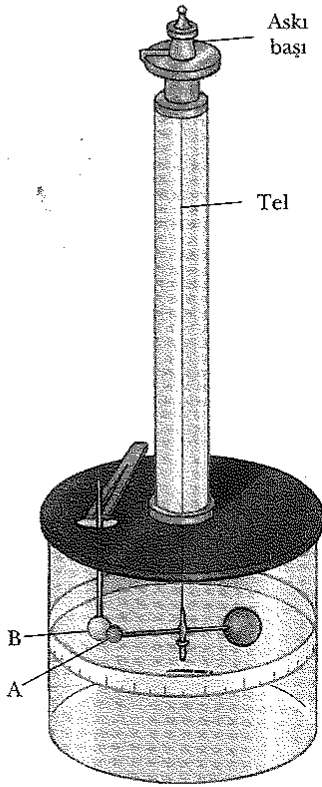


Charles Coulomb (1736-1806)

Coulomb'un bilime en büyük katkısı elektrostatik ve manyetizma alanında oldu. Yaşamı boyunca malzemelerin dayanıklılıklarını inceledi ve kırılgardaki cisimlere etkiyen kuvvetleri belirledi. Böylece yapı mekaniği alanına katkısı oldu. Ergonomi alanındaki çalışmaları en iyi biçimde yapabileme yollarının temelinin anlama-yı sağladı. (Fotoğraf, AIP Niels Bohr Kütüphanesinin izniyle E.Scott Barr koleksiyonundan).

23.3 COULOMB YASASI

Charles Coulomb (1736-1806) kendi buluşu olan burulma terazisini (Şek. 23.5) kullanarak, yüklü cisimler arasındaki elektrik kuvvetlerinin büyüklükle-



Şekil 23.5 İki yük arasındaki elektrik kuvvetin ters-kare yasasına uyduğunu göstermede kullanılan Coulomb burulma terazisi.

Coulomb sabiti

Bir elektron veya protondaki yük

rini ölçtü. Coulomb, yüklü iki küçük küre arasındaki elektrik kuvvetinin, $F \propto 1/r^2$ şeklinde, aralarındaki r uzaklığının karesiyle ters orantılı olduğunu doğruladı. Burulma terazisinin çalışma ilkesi, kütleler yerine yüklü küreler alınmak üzere, çekim sabitini ölçmek için Cavendish'in kullandığı aygıtınki ile aynıdır (Kesim 14.2). Şek. 23.5'teki A ve B yüklü küreler arasındaki elektrik kuvveti, kürelerin birbirlerini çekme ya da itmelerine neden olur. Ortaya çıkan hareket asılı telde bir burulma oluşturur. Burulmuş telin geri çağırıcı momenti, burulma açısıyla orantılı olduğundan, bu açının ölçümü elektriksel çekme veya itme kuvvetinin nicel bir ölçümünü sağlar. Küreler sürtmeyle yüklenirlerse, küreler arasındaki elektrik kuvveti kütle çekimine göre çok büyük olduğundan, kütleçekim kuvveti önemsizlenebilir.

Coulomb, deneyleri, durgun yüklü iki parçacık arasındaki **elektrik kuvvetinin** aşağıdaki özellikleri olduğunu gösterdi:

- Kuvvet, parçacıkları birleştiren doğru boyunca yönelmiş olup aralarındaki r uzaklığının karesiyle ters orantılıdır.
- Kuvvet, parçacıklardaki q_1 ve q_2 yüklerinin çarpımıyla orantılıdır.
- Kuvvet, yükler zıt işaretli olduğunda çekici, aynı işaretli olduğunda iticidir.

Bu gözlemlere dayanarak, **Coulomb yasası** iki noktasal yük arasındaki elektrik kuvvetinin (arasına *Coulomb kuvveti* denilir) büyüklüğünü

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (23.1)$$

şeklinde ifade edebiliriz. Burada k_e , **Coulomb sabiti** denilen bir sabittir. Coulomb, deneyleriyle r nin üssünün, yüzde birkaç belirsizlikle 2 olduğunu gösterebildi. Modern deneylerle üssün 10^{16} da bir kesinlikle 2 olarak verilmiştir.

Coulomb sabitinin değeri birim sistemine bağlıdır. SI birimler sisteminde yük birimi **coulomb**dur (C). SI birimlerinde k_e Coulomb sabitinin değeri:

$$k_e = 8,9875 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

Bu sabit

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

olarak da yazılabilir. Burada ϵ_0 sabiti *boş uzayın elektriksel geçirgenliği* olup değeri $8,8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$ dir.

Doğada bilinen en küçük yük birimi, elektron veya protonda bulunan yük tür ve mutlak değeri:

$$|e| = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Buna göre 1 C yük, yaklaşık $6,24 \times 10^{18}$ elektron ya da proton¹ yüküne eşittir. Bu, 1 cm³ bakırdaki serbest elektronların 10^{23} basamağındaki sayısına² göre

¹ Serbest bir yük olarak e den daha küçük bir yük birimi saptanamamıştır. Bununla birlikte bazı yeni kuramlar, $e/3$ ve $2e/3$ yüke sahip kuark denilen parçacıkların varlığını öne sürmüştür. Madde çekirdeklerinde böyle parçacıkların bulunduğu dair önemli deneysel kanıtlar olmakla beraber, *serbest* kuarklar hiçbir zaman saptanamamıştır. Bu kitabın 46. Bölümünde, kuarkların öteki özellikleri tartışılmıştır.

TABLO 23.1 Elektron, Proton ve Nötronun Yük ve Kütlesi

Parçacık	Yük (C)	Kütle (kg)
Elektron (e)	$-1,6021917 \times 10^{-19}$	$9,1095 \times 10^{-31}$
Proton (p)	$+1,6021917 \times 10^{-19}$	$1,67261 \times 10^{-27}$
Nötron (n)	0	$1,67492 \times 10^{-27}$

çok küçüktür. Yine de 1 C oldukça büyük bir yük miktarıdır. Lâstik veya cam bir çubuğun sürtmeyle yüklendiği deneylerde 10^{-6} C basamağında net bir yük elde edilir. Başka bir deyişle, mevcut toplam yükün ancak çok az bir kısmı çubuk ile sürtünen cisim arasında geçiş yapar.

Elektron, proton ve nötronun yük ve kütleleri Tablo 23.1 de verilmiştir.

ÖRNEK 23.1 Hidrojen Atomu

Hidrojen atomundaki elektron ve proton arasındaki uzaklık ortalama olarak yaklaşık $5,3 \times 10^{-11}$ m dir. Bu parçacıklar arasındaki elektriksel ve kütle-çekim kuvvetlerinin büyüklüğünü bulunuz.

Çözüm Coulomb yasasından elektriksel çekim kuvvetinin büyüklüğünün

$$F_e = k_e \frac{|e|^2}{r^2} = \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5,3 \times 10^{-11} \text{ m})^2}$$

$$= 8,2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

olduğu bulunur.

Newton'un kütle-çekim yasası ve Çizelge 23.1 kullanılarak, kütle-çekim kuvvetinin büyüklüğünün

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2}$$

$$= \left(6,7 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}\right)$$

$$\times \frac{(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1,67 \times 10^{-27} \text{ kg})}{(5,3 \times 10^{-11} \text{ m})^2}$$

$$= 3,6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

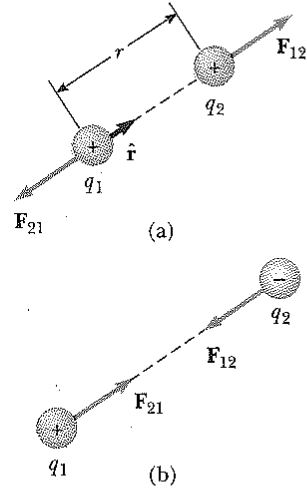
olduğu bulunur. F_e/F_g oranı yaklaşık 2×10^{39} dur. Buna göre atomdaki yüklü parçacıklar arasındaki kütleçekim kuvveti elektriksel kuvvet yanında önemsenmeyebilir. Newton'un kütleçekim yasası ile Coulomb'un elektrik kuvvetleri yasasının biçimsel benzerliğine dikkat ediniz. Büyüklük dışında bu iki kuvvet arasındaki temel fark nedir?

Coulomb yasasıyla uğraşırken, kuvvetin bir *vektörel* nicelik olduğunu unutmayarak işlemler buna göre yapılmalıdır. Buna göre bir q_1 yükünün ikinci bir q_2 yüküne uyguladığı \mathbf{F}_{12} şeklinde yazılan elektrik kuvvetini vektörel olarak ifade eden Coulomb yasası;

$$\mathbf{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (23.2)$$

dir. Burada $\hat{\mathbf{r}}$, Şekil 23.6a daki gibi q_1 den q_2 ye doğru yönelmiş bir birim vektördür. Elektrik kuvveti Newton'un üçüncü yasasına uyduğundan, q_2 nin q_1 e

² Bakır gibi bir metalin atomunda çekirdeğe zayıf olarak bağlı bir veya daha çok dış elektronlar bulunur. Bir metali oluşturmak üzere birçok atom bir araya geldiğinde, *serbest elektron* olarak bilinen ve hiçbir atoma bağlı olmayan elektronlar işte bu dış elektronlardır. Bu elektronlar, bir kapta hareket eden gaz moleküllerine benzer biçimde metal içinde dolanırlar.



Şekil 23.6 Aralarında r uzaklığı olan iki nokta yük birbirlerine Coulomb yasasına göre kuvvet uygularlar. q_2 nin q_1 e uyguladığı F_{21} kuvveti q_1 in q_2 ye uyguladığı F_{12} kuvvetine eşit ve zıt yöndedir. (a) Yüklere aynı işaretli olduklarında kuvvet iticidir. (b) Yüklere zıt işaretli olduklarında kuvvet çekicidir.

etkidiği elektrik kuvveti, q_1 in q_2 ye etkidiği kuvvete büyüklükçe eşit ve zıt yöndedir; yani, $F_{21} = -F_{12}$. Son olarak, (23.2) e göre Şekil 23.6a'daki gibi q_1 ve q_2 aynı işaretli iseler, $q_1 q_2$ çarpımı artı olur ve kuvvet iticidir. q_1 ve q_2 , Şekil 23.6b deki gibi zıt işaretli iseler, $q_1 q_2$ çarpımı eksi olur ve kuvvet çekicidir. $q_1 q_2$ çarpımının işaretine bakılması, yüklere etkiyen kuvvetlerin doğrultusunu belirlemenin kolay bir yoludur.

Sınama Sorusu 23.3

A cisminin yükü $+2 \mu\text{C}$, B cismininki ise $+6 \mu\text{C}$ 'dur. Hangi ifade doğrudur?

- (a) $F_{AB} = -3F_{BA}$ (b) $F_{AB} = -F_{BA}$ (c) $3F_{AB} = -F_{BA}$

İkiden fazla yük bulunduğunda, herhangi bir yük çifti arasındaki kuvvet (23.2) ile verilir. Buna göre yüklerden herhangi biri üzerine etkiyen bileşke kuvvet, öteki her bir yükten ileri gelen kuvvetlerin *vektörel* toplamına eşittir. Örneğin, dört yük bulunması durumunda, 1. parçacık üzerine, 2., 3. ve 4. parçacıkların uyguladığı bileşke kuvvet

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_{31} + \mathbf{F}_{41}$$

ile verilir.

ÖRNEK 23.2 Bileşke Kuvveti Bulunuz

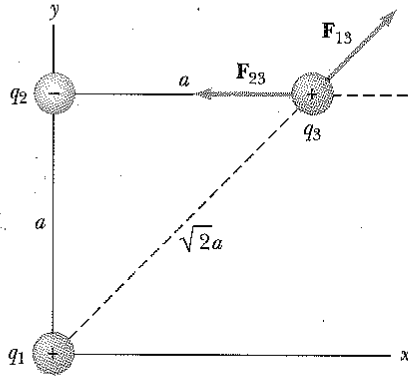
Şekil 23.7 deki üçgenin köşelerine konulmuş üç nokta yük düşününüz. Burada $q_1 = q_3 = 5,0 \mu\text{C}$, $q_2 = -2,0 \mu\text{C}$ ve $a = 0,10 \text{ m}$. q_3 üzerine etkiyen bileşke kuvveti bulunuz.

Çözüm Önce, q_1 ve q_2 nin q_3 e uyguladığı kuvvetlerin doğrultularını belirtelim. q_2 ve q_3 zıt işaretli olduklarından, q_2 nin q_3 e uyguladığı F_{23} kuvveti çekicidir. q_1 in q_3 e uyguladığı F_{13} kuvveti, ikisi de artı olduklarından iticidir.

F_{23} kuvvetinin büyüklüğü:

$$\begin{aligned} F_{23} &= k_e \frac{|q_2||q_3|}{a^2} \\ &= \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(2,0 \times 10^{-6} \text{ C})(5,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,10 \text{ m})^2} \\ &= 9,0 \text{ N} \end{aligned}$$

q_3 ve q_2 zıt işaretli olduklarından, F_{23} Şekil 23.7 deki gibi sola doğrudur.



Şekil 23.7 q_1 in q_3 e uyguladığı kuvvet F_{13} , q_2 nin q_3 e uyguladığı kuvvet F_{23} dır. q_3 e etkiyen bileşke F_3 kuvveti, $F_{13} + F_{23}$ vektör toplamıdır.

q_1 in q_3 e uyguladığı kuvvetin büyüklüğü:

$$F_{13} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{(\sqrt{2}a)^2}$$

$$= \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(5,0 \times 10^{-6} \text{ C})(5,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{2(0,10 \text{ m})^2}$$

$$= 11 \text{ N}$$

F_{13} kuvveti itici olup x eksenine 45° lik bir açı yapar. Bunun için F_{13} ün x ve y bileşenleri aynı $F_{13} \cos 45^\circ = 7,9 \text{ N}$ büyüklüğündedirler.

F_{13} kuvveti eksi x doğrultusundadır. Buna göre, q_3 e etkiyen bileşke kuvvetin x ve y bileşenleri:

$$F_{3x} = F_{13x} + F_{23} = 7,9 \text{ N} - 9,0 \text{ N} = -1,1 \text{ N}$$

$$F_{3y} = F_{13y} = 7,9 \text{ N}$$

q_3 e etkiyen bileşke kuvveti birim vektörlerle belirtilebilir:

$$\mathbf{F}_3 = (-1,1\mathbf{i} + 7,9\mathbf{j}) \text{ N}$$

Alıştırma F_3 bileşke kuvvetin büyüklük ve doğrultusunu bulunuz.

Cevap x eksenine 98° lik açıda $8,0 \text{ N}$.

ÖRNEK 23.3 Bileşke Kuvvet Nerede Sıfırdır?

Üç nokta yük, Şekil 23.8 deki gibi, x ekseninde bulunmaktadır. Artı $q_1 = 15 \mu\text{C}$ yükü $x = 2 \text{ m}$ de, artı $q_2 = 6 \mu\text{C}$ yükü de başlangıç noktasında bulunmaktadır. q_3 e etkiyen bileşke kuvvet sıfırdır. q_3 ün x koordinatı nedir?

Çözüm q_3 eksi, q_1 ve q_2 nin her ikisi de artı olduğundan, F_{13} ve F_{23} kuvvetleri, Şekil 23.7 de ki gibi, çekicidir. Coulomb Yasasına göre, F_{13} ve F_{23} kuvvetlerinin büyüklükleri

$$F_{13} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{(2,00 - x)^2} \quad F_{23} = k_e \frac{|q_2||q_3|}{x^2}$$

dir. q_3 e etkiyen bileşke kuvvet sıfır olması için, F_{23} , F_{13} e eşit ve zıt olmalıdır, veya

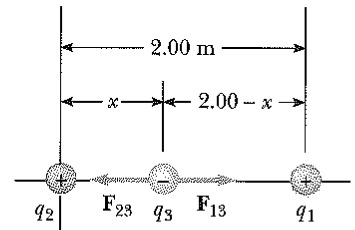
$$k_e \frac{|q_2||q_3|}{x^2} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{(2,00 - x)^2}$$

Eşitliğin her iki tarafı $k_e|q_3|$ e bölünüp düzenlenirse,

$$(2 - x)^2 |q_2| = x^2 |q_1|$$

$$(4 - 4x + x^2) (6 \times 10^{-6} \text{ C}) = x^2 (15 \times 10^{-6} \text{ C})$$

bulunur. İkinci dereceden bu denklemden x çözüldüğünde, $x = 0,775 \text{ m}$ bulunur. Eksi kök neden kabul edilemez?



Şekil 23.8 Üç nokta yük x ekseninde bulunmaktadır. q_3 e etkiyen net kuvvet sıfırsa, bu durumda, q_1 in q_3 e uyguladığı F_{13} kuvveti, q_2 nin q_3 e uyguladığı F_{23} kuvvetine büyüklükçe eşit fakat zıt yönde olmalıdır.

ÖRNEK 23.4 Küreler Üzerindeki Yükü Bulunuz

Herbirinin kütlesi $3 \times 10^{-2} \text{ kg}$ olan yüklü özdeş iki küçük küre, Şekil 23.9a daki gibi dengede asılı durmaktadır. İplerin herbiri $0,15 \text{ m}$ uzunluğunda ve açı $\theta = 5^\circ$ dir. Her bir küredeki yük miktarını bulunuz.

Çözüm Şekil 23.9a daki dik üçgenden $\sin \theta = a/L$ ol-

duğu görülüyor. Buna göre

$$a = L \sin \theta = (0,15 \text{ m}) \sin 5^\circ = 0,013 \text{ m}$$

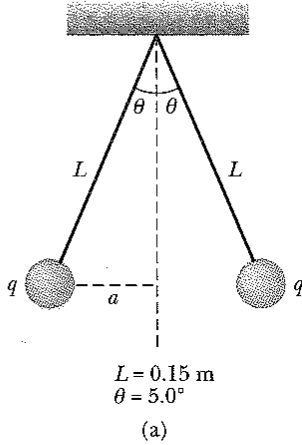
küreler arası uzaklık $2a = 0,026 \text{ m}$ dir.

Sol küreye etkiyen kuvvetler Şekil 23.9b de gösterilmiştir. Küre dengede olduğundan yatay ve düşey kuvvetler bi-

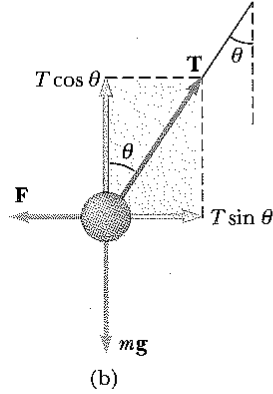
leşkesi ayrı ayrı sıfır olmalıdır:

$$(1) \quad \sum F_x = T \sin \theta - F_e = 0$$

$$(2) \quad \sum F_y = T \cos \theta - mg = 0$$



Şekil 23.9 (a) İplerle asılı aynı q yüklü özdeş iki kürenin dengede bulunması. (b) yüklü kürelerden soldaki için serbest-cisim çizimi.



(2) den bulunan $T = mg / \cos \theta$, (1) de yerine konularak F_e elektrik kuvvetinin büyüklüğü bulunur:

$$(3) \quad F_e = mg \tan \theta \\ = (3 \times 10^{-2} \text{ kg}) (9,80 \text{ m/s}^2) \tan (5^\circ) \\ = 2,6 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Coulomb yasasından (Eş. 23.1), elektrik kuvvetinin büyüklüğü

$$F_e = k_e \frac{|q|^2}{r^2}$$

dir. Burada, $r = 2a = 0,026 \text{ m}$ ve $|q|$ her bir küre üzerindeki yük miktarıdır. (Burada $|q|^2$ teriminin ortaya çıkması, her iki kürede de aynı miktarda yük bulunmasındandır.) Bu denklemden $|q|^2$ çözülerek yük bulunabilir:

$$|q|^2 = \frac{F_e r^2}{k_e} = \frac{(2,6 \times 10^{-2} \text{ N}) (0,026 \text{ m})^2}{8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2}$$

$$|q| = 4,4 \times 10^{-8} \text{ C}$$

Aıştırma Kürelerdeki yük eksi olduğunda, kürelere $-4,4 \times 10^{-8} \text{ C}$ luk net yük kazandırmak için kaç elektron katılması gerekir?

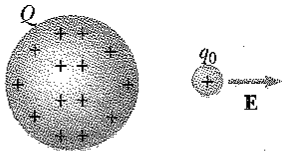
Cevap $2,7 \times 10^{11}$ elektron.

Ev Deneyi

Bu deney için 20 cm'lik saydam iki şerite (her birinin kütlesi $\approx 65 \text{ mg}$) gereksiniminiz vardır. Bir sap yapmak için şeritleri bir ucundan 1 cm katlayınız. Şeritleri bir masa üzerine yanyana bastırıp parmağınızla üzerinden ileri geri sürtünüz. Şeritleri yüzeyden çabucak sıyrıldığınızda yüklenirler. Şeritleri saplarından birlikte tuttuğunuzda şeritler birbirlerini iterek ters bir "V" şeklini alırlar. Şeritler arasındaki açıyı ölçerek şeritlerin her birindeki fazla yükü tahmin ediniz. Yüklerin, şeritlerin kütle merkezlerinde bulunuyor gibi etkileştiklerini varsayınız.

23.4 ELEKTRİK ALANI

11.5 Şimdiye dek kütle çekim kuvveti ve elektrik kuvveti olmak üzere, tartışmalarda iki alan kuvveti tanıttık. Bundan önce değinildiği üzere, alan kuvvetleri, uzayda cisimler birbirlerine fiziksel olarak değmeseler bile etkileşebilirler. Uzayda bir noktadaki, \mathbf{g} kütle-çekim alanının, m deneme kütesine etkiyen \mathbf{F}_g kütle-çekim kuvvetinin, deneme kütesine bölümüne eşit olduğu Kesim 14.6'da tanımlanmıştı: $\mathbf{g} = \mathbf{F}_g / m$. Elektrik kuvvetlerine benzer bir yaklaşım Michael Faraday tarafından yapılmıştır. Bunun pratik önemi nedeniyle gelecek birkaç bölümde de değinilmiştir. Bu yaklaşımda elektrik yüklü bir cisim saran uzay bölgesinde **elektrik alanının** bulunduğu söylenir. Bu alana başka bir yüklü cisim girdiğinde buna bir elektrik kuvveti etkir. Örneğin, küçük bir artı q_0 deneme yükünün daha büyük artı yük taşıyan ikinci bir cismin yakınında bulunduğu Şekil 23.10 da göz önüne alınsın. Deneme yükünün konumundaki elektrik alanın şiddeti (başka deyişle büyüklüğü) **birim yük başına** elektrik kuvveti olarak tanımlanır. Daha kesin bir anlatımla,



Şekil 23.10 Çok daha büyük artı Q yükü taşıyan bir cismin yakınına konulmuş küçük bir artı q_0 deneme yüküne gösterilen doğrultuda bir \mathbf{E} elektrik alanı etkir.

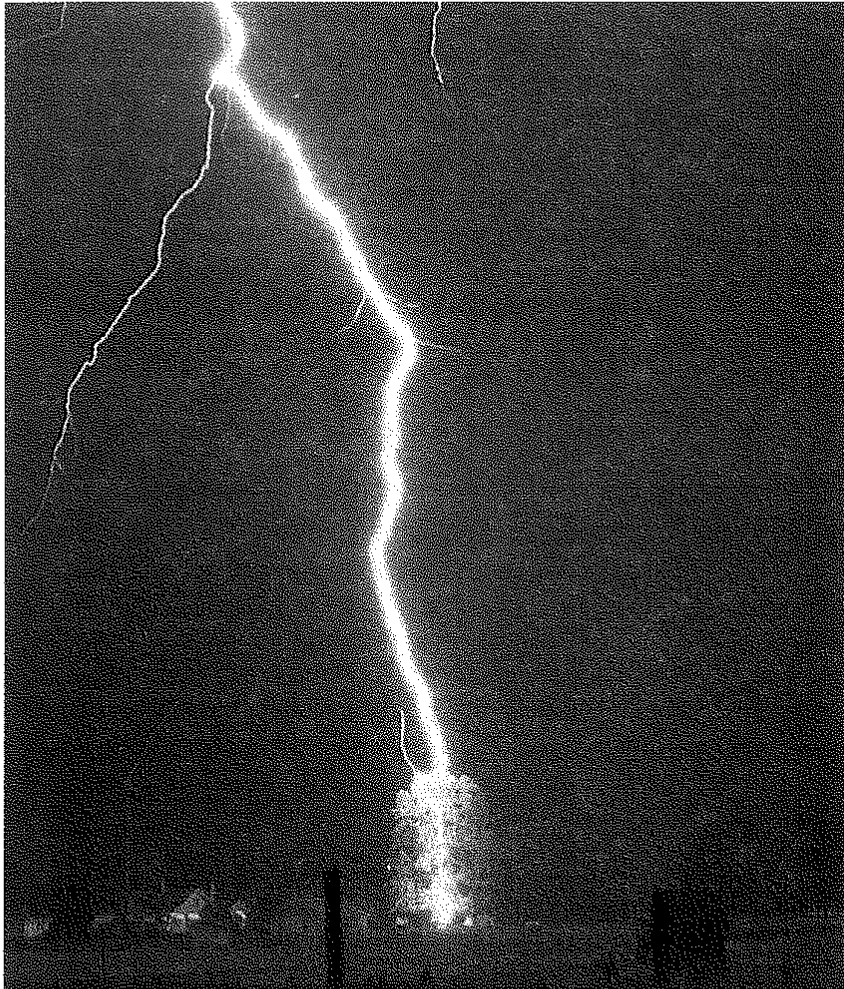
uzayda bir noktadaki **E elektrik alanı**, o noktaya konulan artı bir deneme yüküne etkileyen F_e elektrik kuvvetinin deneme yükünün q_0 büyüklüğüne bölümü olarak tanımlanır:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{q_0} \quad (23.3)$$

Elektrik alanın tanımı

E, deneme yükünce oluşturulmayıp deneme yüküne *dışarıdan* etkileyen bir alandır. Ayrıca elektrik alanının varoluşu, kaynağının bir özelliğidir. Örneğin, her elektronla birlikte kendi alanı da vardır.

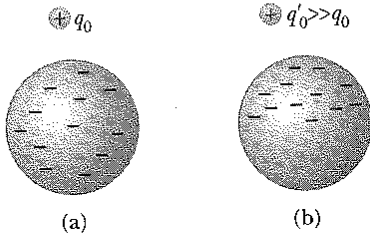
E vektörünün SI sistemindeki birimi coulomb başına newtondur (N/C) ve Şekil 23.10'daki gibi doğrultusu, alana konulan artı bir deneme yüküne etkileyen kuvvetin doğrultusudur. **F** nin artı bir deneme yüküne etkidiğini varsaydıgımızdan **E**, **F** doğrultusundadır. Buna göre, **durgun bir deneme yükü bir noktaya konulduğunda elektrik kuvvet etkisinde kalırsa, o noktada bir elektrik alanı vardır** denir. Bir noktadaki elektrik alanın doğrultu ve büyüklüğü bir kez bi-



Kırsal kesim evleri yakınında bir ağaca yıldırım düşüş anını yakalamış olan heyecan verici fotoğraf (©Johnny Autery)

TABLO 23.2 Bazı Örnek Elektrik Alan Değerleri

Kaynak	E(N/C)
Floresan lâmba	10
Atmosfer (iyi havada)	100
Saça sürtülmüş balon	1000
Atmosfer (şimşekli bulutlarla kaplı)	10 000
Fotokopi makinesi	100 000
Havadaki kıvılcım	>3 000 000
Hidrojen atomunda elektron yakını	5.10^{11}



Şekil 23.11 (a) Yeterince küçük q_0 deneme yükü için küredeki yük dağılımı değişmez. (b) q_0' deneme yükü büyük olduğunda küredeki yük dağılımı q_0' 'in yakınlığı nedeniyle değişir.

lindikten sonra, o noktaya konulan yüklü herhangi bir parçacığa etkiyen kuvvet Eş. 23.3'den hesaplanabilir. Bunun yanında, **bir noktada deneme yükün bulunup bulunmadığına bakılmaksızın** (boş uzayda bile) o noktada elektrik alanının bulunduğu söylenir. (Bu, bir cismin oluşturduğu kütle-çekim alanına benzerdir. Bu alanın o noktada, alanı algılaması için başka bir cismin bulunup bulunmamasına bakılmaksızın, var olduğu söylenir.) Çeşitli kaynakların elektrik alan büyüklükleri Tablo 23.2'de verilmiştir.

Eş. (23.3) kullanılırken, q_0 deneme yükünün elektrik alanı oluşturan yük dağılımını bozmayacak kadar küçük olduğu varsayılır. Şekil 23.11a'daki gibi düzgün yüklü bir metal küre yakınına son derece küçük bir q_0 deneme yükü konulduğunda, elektrik alanını oluşturan metal küredeki yük düzgün dağılımını korur. Deneme yükü Şekil 23.11b'deki gibi yeterince büyük olduğunda ($q_0' >> q_0$), metal küredeki yük, yeni bir düzenlemeye uğrar ve kuvvetin deneme yüküne oranı farklı olur: ($F_e'/q_0' \neq F_e/q_0$). Bu durumda, metal küredeki bu yük dağılımının yeniden düzenlenişi nedeniyle, oluşturduğu elektrik alanı, çok daha küçük q_0 bulunması durumunda oluşturulan alanlardan farklıdır.

Bir elektrik alanının doğrultusunu belirlemek için Şekil 23.12'deki gibi bir P noktasındaki bir q_0 deneme yükünden r uzaklığında bulunan bir q nokta yükünü ele alalım. Coulomb yasasına göre q yükünün deneme yüküne uyguladığı kuvvet;

$$F_e = k_e \frac{qq_0}{r^2} \hat{r}$$

dir. Burada \hat{r} , q dan q_0 a yönelik birim vektördür. Deneme yükünün bulunduğu konumda elektrik alanı $E = F_e/q_0$ ile tanımlandığından, q nun P de oluşturduğu elektrik alanı:

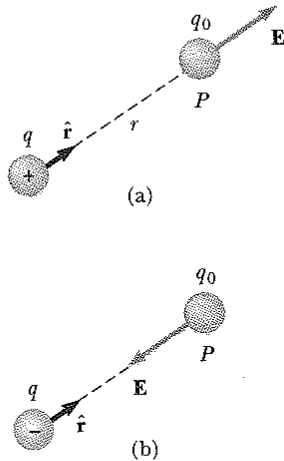
$$E = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (23.4)$$

dir. Şekil 23.12a'daki gibi, q artı ise, alan, bu yükten yarıçap boyunca dışarı doğru yönelmiştir. Şekil 23.12b'deki gibi q eksi ise, alan, yüke doğru yöneliktir.

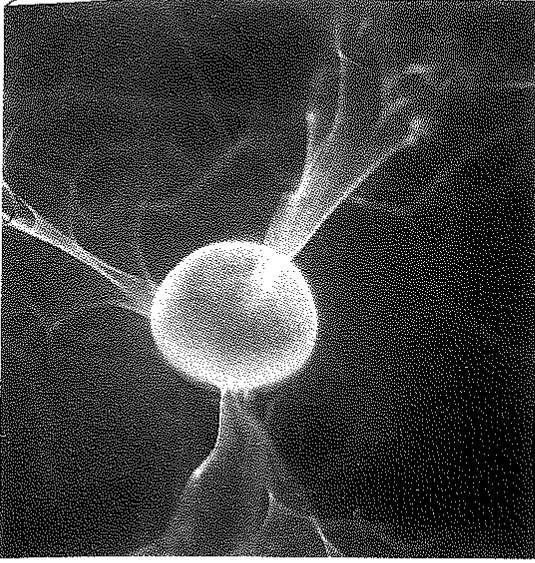
Nokta yükler topluluğundan ileri gelen elektrik alanını hesaplamak için, Eş. 23.4 kullanılarak P noktasındaki elektrik alan vektörleri tek tek bulunup vektörel olarak toplanır. Başka bir deyişle,

yükler topluluğunun herhangi bir P noktasında oluşturduğu toplam elektrik alanı, bütün yüklerin elektrik alanlarının vektörel toplamına eşittir.

Alanlara uygulanan bu üstüste binme ilkesi, elektrik kuvvetlerinin üst üste binme özelliğinin doğal bir sonucudur. Buna göre, yükler topluluğunun elektrik alanı



Şekil 23.12 P noktasındaki q_0 deneme yükü, q nokta yükünden r uzaklığındadır. (a) q artı ise, P deki elektrik alanı yarıçap boyunca q den dışarı doğrudur. (b) q eksi ise, P deki elektrik alanı yarıçap boyunca içeri doğru q ye yöneliktir.



Bir üreteçle yüklenen bu metal küre net bir elektrik yükü taşımaktadır. Küredeki yük yoğunluğu, çevresinde şiddetli elektrik alanı oluşturur. Böylece yükler küreyi saran gazdan kaçarak pembe ışıdamaya yol açarlar. (E.R. Degginer/H. Armstrong Roberts)

$$\mathbf{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \quad (23.5)$$

şeklinde belirtilebilir. Burada, r_i i inci q_i yükünden P noktasına (deneme yükünün bulunduğu yer) olan uzaklık ve $\hat{\mathbf{r}}_i$, q_i den P ye yönelmiş bir birim vektördür.

Sınama Sorusu 23.4

$+3 \mu\text{C}$ 'luk bir yük $4,10^6 \text{ N/C}$ büyüklüğünde sağa yönelik elektrik alanının bulunduğu bir P noktasındadır. Bu yük yerine $-3 \mu\text{C}$ 'luk bir yük konulursa P deki elektrik alana ne olur?

ÖRNEK 23.5 İki Yükün Elektrik Alanı

Bir $q_1 = 7,0 \mu\text{C}$ yükü başlangıç noktasında, ikinci bir $q_2 = -5,0 \mu\text{C}$ yükü x ekseninde başlangıçtan $0,3 \text{ m}$ uzakta bulunmaktadır (Şekil 23.13). $(0; 0,40) \text{ m}$ koordinatlı P noktasındaki elektrik alanını bulunuz.

Çözüm Önce, her bir elektrik yükünden ileri gelen elektrik alanlarının büyüklüklerini bulalım. P noktasındaki $7,0 \mu\text{C}$ yükünden ileri gelen \mathbf{E}_1 ve $-5,0 \mu\text{C}$ yükünden ileri gelen \mathbf{E}_2 alanları Şekil 23.13 de gösterilmiştir. Bunların büyüklükleri

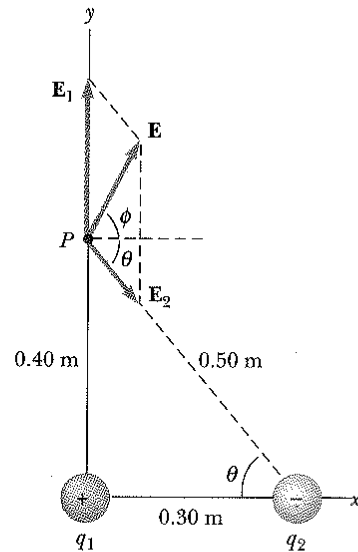
$$E_1 = k_e \frac{|q_1|}{r_1^2} = \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(7,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,40 \text{ m})^2}$$

$$= 3,9 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k_e \frac{|q_2|}{r_2^2} = \left(8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(5,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,50 \text{ m})^2}$$

$$= 1,8 \times 10^5 \text{ N/C}$$

\mathbf{E}_1 vektörünün yalnız y bileşeni vardır. \mathbf{E}_2 vektörünün $E_2 \cos \theta = \frac{3}{5} E_2$ ile verilen x bileşeni, $-E_2 \sin \theta = -\frac{4}{5} E_2$ ile verilen eksi y bileşeni bulunmaktadır. Böylece vektörleri,



Şekil 23.13 P deki \mathbf{E} toplam elektrik alanı $\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$ vektör toplamına eşittir. Burada \mathbf{E}_1 , q_1 artı yükünden, \mathbf{E}_2 ise eksi q_2 yükünden ileri gelen alanlardır.

$$E_1 = 3,9 \times 10^5 \text{ j N/C}$$

$$E_2 = (1,1 \times 10^5 \text{ i} - 1,4 \times 10^5 \text{ j}) \text{ N/C}$$

şeklinde ifade edilebilir. P deki E bileşke alanı, E_1 ve E_2 nin üstüste birinmesiyle oluşur:

$$E = E_1 + E_2 = (1,1 \times 10^5 \text{ i} + 2,5 \times 10^5 \text{ j}) \text{ N/C}$$

Bu sonuçtan, E nin $2,7 \times 10^5 \text{ N/C}$ büyüklüğünde ve artı x eksenine 66° lik ϕ açısı yaptığı bulunur.

Alıştırma P de bulunan $2 \times 10^{-8} \text{ C}$ luk bir yüke etkiyen elektriksel kuvveti bulunuz.

Cevap E ile aynı doğrultuda $5,4 \times 10^{-3} \text{ N}$.

ÖRNEK 23.6 Bir Dipolün Elektrik Alanı

Bir elektrik dipolü, aralarında belli bir uzaklık bulunan artı ve eksi $-q$ yük çiftinden oluşur. Şekil 23.14 deki dipol için P noktasında bu yüklerin oluşturduğu E elektrik alanını bulunuz. Burada P , başlangıç noktasından $y \gg a$ uzaklığındadır.

Çözüm P noktası yüklerden aynı uzaklıkta bulunduğundan, bu noktada bu iki yükün oluşturduğu E_1 ve E_2 alanlarının büyüklükleri eşittir. Toplam alan $E = E_1 + E_2$ olup burada:

$$E_1 = E_2 = k_e \frac{q}{r^2} = k_e \frac{q}{y^2 + a^2}$$

dir. E_1 ve E_2 nin y bileşenleri birbirini yok ederler, x bileşenleri ise artı x yönünde olup birbirlerine eşittir. Bunun sonucu olarak E , x eksenine paralel olup $2E_1 \cos \theta$ büyüklüğündedir. Şekil 23.14 den $\cos \theta = a/r = a/(y^2 + a^2)^{1/2}$ olduğu görülür. Bu nedenle

$$E = 2E_1 \cos \theta = 2k_e \frac{q}{(y^2 + a^2)} \frac{a}{(y^2 + a^2)^{1/2}}$$

$$= k_e \frac{2qa}{(y^2 + a^2)^{3/2}}$$

$y \gg a$ den dolayı a^2 önemsenmeyebileceği için

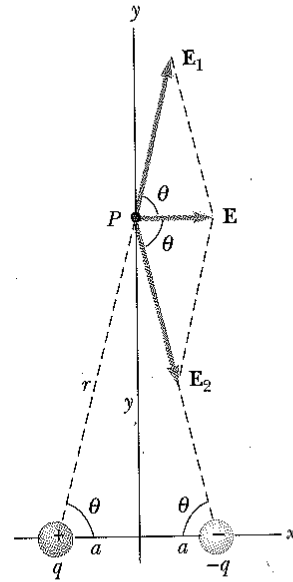
$$E = k_e \frac{2qa}{y^3}$$

yazılabilir.

Böylece, iki yükü birleştiren doğru parçasının orta dikmesi üzerinde uzak noktalarda dipolün oluşturduğu elektrik alanının $1/r^3$ le değiştiği, oysa bir nokta yükün alanının $1/r^2$ ile daha yavaş değiştiği görülür. (Bakınız Eş. 23.4) Bunun nedeni, uzak noktalarda eşit büyüklükte zıt iki yükün alanlarının birbirlerini hemen hemen yok etmeleridir. Çift kutuplunun (dipolün) E alanının $1/r^3$ değişimi, x eksen

üzerindeki (Problem 21) veya herhangi genel konumdaki uzak bir nokta için de elde edilebilir.

Dipol, Hidroklorik asit (HCl) gibi birçok molekül için iyi bir modeldir. Nötr atom ve moleküllerin bir elektrik alanı içine konulduklarında dipol (çiftkutuplu) gibi davranışları, sonraki bölümlerde görülecektir. Bundan başka, HCl gibi birçok molekül kalıcı çiftkutupludur. Böyle çiftkutupluların elektrik alanına konulan maddelerin davranışları üzerindeki etkisi, Bölüm 26 da incelenecektir.



Şekil 23.14 Eşit ve zıt iki yükün (elektrik çift kutuplu) P de oluşturduğu E toplam elektrik alanı, $E_1 + E_2$ vektör toplamına eşittir. E_1 , artı q yükünden ileri gelen alan, E_2 , eksi $-q$ yükünden ileri gelen alandır.

23.5

SÜREKLİ BİR YÜK DAĞILIMININ ELEKTRİK ALANI

Çoğu kez bir yükler topluluğunun yükleri arasındaki uzaklıklar ilgilenilen bir noktanın (örneğin elektrik alanın hesaplanacağı bir nokta) topluluktan olan uzaklığından çok daha küçüktür. Böyle durumlarda yükler sistemi *süreklidir*.

Yani, birbirlerine yakın yüklerden oluşan bir sistem, bir çizgi, bir yüzey veya hacim üzerinde sürekli biçimde dağılmış toplam bir yüke eşdeğerdir.

Sürekli bir yük dağılımının elektrik alanını hesaplamak için şu işlem yapılır: Önce, yük dağılımı, Şekil 23.15 teki gibi her birinde Δq küçük yüklerinin bulunduğu küçük parçalara ayrılır. Sonra, bu parçalardan birinin bir P noktasında oluşturduğu elektrik alanını hesaplamak için Eş. 23.4 kullanılır. Son olarak, bütün küçük yük parçalarının katkıları toplanarak (yani, üstüste binme ilkesi uygulanarak) yük dağılımının P de oluşturduğu toplam alan hesaplanır.

Bir Δq yük parçasının P de oluşturduğu elektrik alanı

$$\Delta \mathbf{E} = k_e \frac{\Delta q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

ile verilir. Burada r , elemanın P ye olan uzaklığı ve $\hat{\mathbf{r}}$, yük elemanından P ye doğru yönelmiş bir birim vektördür. Yük dağılımındaki bütün elemanların P de oluşturduğu toplam elektrik alanı yaklaşık olarak

$$\mathbf{E} = k_e \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i$$

Burada i indisi, dağılımdaki i inci parçayı belirtir. Yük dağılımı yaklaşık sürekli olduğundan, P deki toplam alan, $\Delta q_i \rightarrow 0$ limitinde

$$\mathbf{E} = k_e \lim_{\Delta q_i \rightarrow 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (23.6)$$

olur. Burada integral tüm yük dağılımı üzerindedir. Bu bir vektörel işlem olduğundan dikkatle ele alınmalıdır.

Bu tür hesaplamalar birkaç örnekle gösterilecektir. Bu örneklerde yükün bir doğru, bir yüzey veya bir hacme düzgün olarak dağıldığı varsayılacaktır. Böyle hesaplar yapılırken aşağıdaki tanımlamalarla birlikte yük yoğunluğu kavramını kullanmak kolaylık sağlar:

- Bir Q yükü bir V hacmine düzgün olarak dağılmışsa, ρ **hacimsel yük yoğunluğu**

$$\rho = \frac{Q}{V}$$

ile tanımlanır. Burada ρ 'nun birimi metre küp başına coulombdur (C/m^3).

- Bir Q yükü, A yüzölçümlü bir yüzeye düzgün olarak dağılmışsa, σ **yüzeysel yük yoğunluğu**

$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

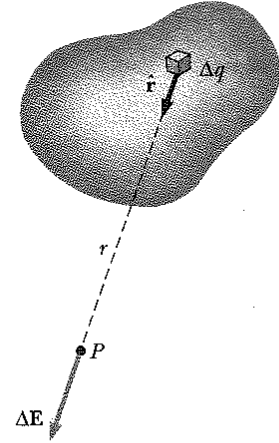
ile tanımlanır. Burada σ nın birimi metre kare başına coulombdur (C/m^2).

- Bir Q yükü ℓ uzunluğunda bir doğru boyunca düzgün olarak dağılmışsa, λ **doğrusal yük yoğunluğu**

$$\lambda = \frac{Q}{\ell}$$

ile tanımlanır. Burada λ nın birimi metre başına coulombdur (C/m).

Sürekli bir yük dağılımı



Şekil 23.15 Sürekli bir yük dağılımının P de oluşturduğu elektrik alanı, yük dağılımının bütün Δq öğelerinden ileri gelen $\Delta \mathbf{E}$ alanların vektörel toplamıdır.

Sürekli bir yük dağılımının elektrik alanı

Hacimsel yük yoğunluğu

Yüzeysel yük yoğunluğu

Çizgisel yük yoğunluğu

- Yük, bir hacim, yüzey veya doğru üzerinde düzgün olmayan biçimde dağılmışsa yük dağılımlarının

$$\rho = \frac{dQ}{dV} \quad \sigma = \frac{dQ}{dA} \quad \lambda = \frac{dQ}{d\ell}$$

şeklinde belirtilmesi gerekir. Burada dQ , küçük bir hacim, yüzey veya uzunluk öğesindeki yük miktarıdır.

ÖRNEK 23.7 Yüklü Bir Çubuğun Elektrik Alanı

ℓ uzunluklu bir çubuğun toplam yükü Q , boyca yük yoğunluğu λ dir. Çubuk ekseninde, çubuğun bir ucundan d uzaklığında bir P noktasındaki elektrik alanını hesaplayınız (Şek. 23.16).

Çözüm Çubuğun x ekseninde boyunca uzandığı, küçük bir parçasının uzunluğunun dx , bu parçadaki yükün dq olduğu varsayalım. Çubuğun birim uzunluk başına yükü λ olduğundan küçük dx parçasındaki dq yükü, $dq = \lambda dx$ olur.

Bu parçanın P noktasında oluşturduğu dE alanı, eksi x doğrultusunda olup (alan kaynağı yük artı olduğu için) büyüklüğü,

$$dE = k_e \frac{dq}{x^2} = k_e \lambda \frac{dx}{x^2}$$

ile verilir. Her bir elemanın oluşturduğu alan eksi x doğrultusunda olduğundan, bunların katkılarının toplanması bu durumda oldukça basittir. P ye farklı uzaklıklarda bulunan çubuğun bütün parçalarının P de oluşturduğu toplam alan, Eş. 23.6 ile verilir. Bu ifade, integral sınırları çubuğun bir ucundan ($x = a$) öteki ucuna ($x = \ell + a$) kadar değişmek üzere

$$E = \int_a^{\ell+a} k_e \lambda \frac{dx}{x^2}$$

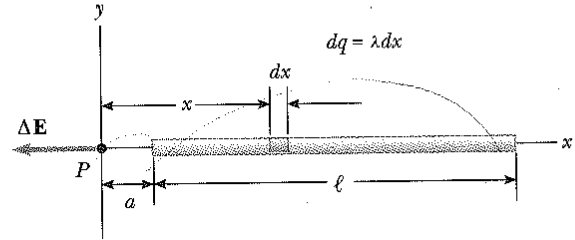
şeklini alır.³

k_e ve λ sabit olduklarından integral dışına alınabilirler. Toplam yük $Q = \lambda \ell$ olmak üzere,

$$\begin{aligned} E &= k_e \lambda \int_a^{\ell+a} \frac{dx}{x^2} = k_e \lambda \left[-\frac{1}{x} \right]_a^{\ell+a} \\ &= k_e \lambda \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{\ell+a} \right) = \frac{k_e Q}{a(\ell+a)} \end{aligned}$$

bulunur.

P noktası çubuktan uzakta ise ($a \gg \ell$), paydadaki ℓ , önemsenmeyebilir ve $E \approx k_e Q/a^2$ olur. Bu bir nokta yük için beklenen sonuçtur. Bu nedenle a/ℓ nin büyük değerlerinde çubuktaki yük dağılımı, Q büyüklüğünde bir nokta yük gibi gözükür. Kuramsal bir formülün kontrolü için limit alma ($a/\ell \rightarrow \infty$) çoğu kez iyi bir yöntemdir.



Şekil 23.16 x ekseninde bulunan düzgün yüklü bir çubuğun P deki elektrik alanı. dq yük öğesinin P deki alanı $k_e dq/x^2$ ile verilir. P deki toplam alan, çubuğun bütün parçaları üzerinden alınan vektörel toplamdır.

ÖRNEK 23.8 Düzgün Yüklü Bir Halkanın Elektrik Alanı

a yarıçaplı bir halka üzerinde düzgün olarak dağılmış artı bir Q yükü bulunmaktadır. Halka ekseninde, halka merkezinden x uzaklığında bir P noktasında halkanın elektrik alanını hesaplayınız (Şek. 23.17a).

Çözüm dq yük parçasının P de oluşturduğu elektrik alanının büyüklüğü:

$$dE = k_e \frac{dq}{r^2}$$

Bu alanın, halka eksenine paralel $dE_x = dE \cos \theta$, x bileşeni ve dik dE_\perp bileşeni vardır. Şekil 23.17b den görüldüğü gibi, dik bileşenler toplamı sıfır olduğundan, P deki bileşke alan x ekseninde doğrultusundadır. Yani, bir yük parçasının dik bi-

³ Bu tür integrallerin nasıl hesaplanacağını bilmesi önemlidir. Önce dq yük öğesi integraldeki öteki değişkenler cinsinden belirtilir (bu örnekte tek bir x değişkeni bulunduğundan $dq = \lambda dx$ değişimi yapılmıştır). İntegralin skaler nicelikler üzerinden alınması gerekir; bu bakımdan gerektiğinde elektrik alanın bileşenleri cinsinden belirtilmesi gerekir. (Bu örnekte alanın yalnız x bileşeni olduğundan bu ayrıntı ile uğraşılması gerekmez.) Bundan sonra bulunan ifade tek değişkenli bir integrale indirgenir (ya da her biri tek değişkenli katlı integrale). Küresel veya silindirik simetrik örneklerde tek değişken radyal koordinat olur.

leşeni, halkanın karşı yanındaki öteki yük parçasının dik bileşenince yok edilir. $r = (x^2 + a^2)^{1/2}$ ve $\cos\theta = x/r$ olduğundan

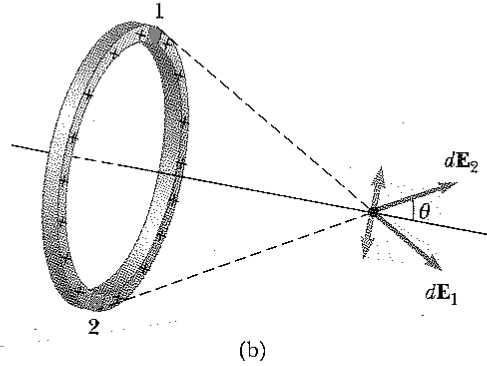
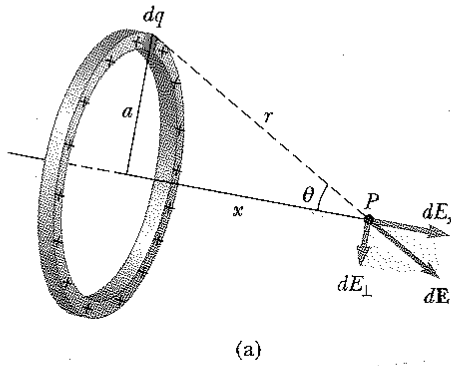
$$dE_x = dE \cos\theta = \left(k_e \frac{dq}{r^2}\right) \frac{x}{r} = \frac{k_e x}{(x^2 + a^2)^{3/2}} dq$$

bulunur. Halkanın bütün parçalarının P deki alana katkıları, bu noktaya eşit uzaklıkta bulunduklarından aynıdır. Buna göre, P deki toplam alanı elde etmek için bütün elemanlar üzerinden integral alınır:

$$E_x = \int \frac{k_e x}{(x^2 + a^2)^{3/2}} dq = \frac{k_e x}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \int dq = \frac{k_e x}{(x^2 + a^2)^{3/2}} Q$$

Bu sonuç $x = 0$ da alanın sıfır olduğunu gösterir. Bu bulgu sizi şaşırttı mı?

Alıştırma Şekil 23.17'deki gibi eksen boyunca halkadan çok uzaklarda ($x \gg a$) elektrik alanının, bir Q nokta yükünününe yaklaştığını gösteriniz.



Şekil 23.17 a yarıçaplı düzgün yük dağılımlı bir halka. (a) Bir dq yük parçasının x eksenindeki P de oluşturduğu alan. (b) P deki toplam elektrik alanı x eksenine doğrudur. P de parça 1 den ileri gelen elektrik alanının normal bileşeni, parça 2 den ileri gelen normal bileşence yok edilir.

ÖRNEK 23.9 Düzgün Yük Dağılımlı Bir Diskin Elektrik Alanı

R yarıçaplı bir disk, σ düzgün yüzeyel yük yoğunluğu vardır. Diskin ekseninde, merkezinden x uzaklığında bir P noktasındaki elektrik alanı hesaplayınız (Şek. 23.18).

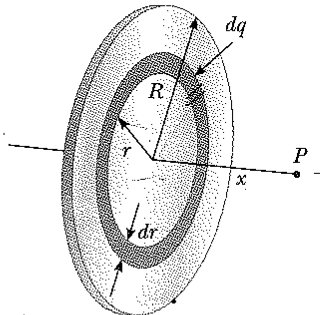
Çözüm Disk aynı merkezli halkalar takımı olarak düşünülmürse r yarıçaplı bir halkanın alanını veren Örnek 23.8 den yararlanıp, diski oluşturan bütün halkaların katkıları

toplanabilir. Simetriden dolayı eksen üzerindeki bir noktada alan eksen boyunca olmalıdır.

r yarıçaplı dr enli halkanın alanı $2\pi r dr$ dir (Şek. 23.18). Bu halkadaki $dq = 2\pi\sigma r dr$ yükü, halka yüzölçümü ile yüzey yük yoğunluğunun çarpımına eşittir. Bu sonucu, Örnek 23.8 deki E_x bağıntısında (a yerine r olarak) kullanarak, halkanın oluşturduğu alan için

$$dE = \frac{k_e x}{(x^2 + r^2)^{3/2}} (2\pi\sigma r dr)$$

elde edilir. P deki toplam alanı bulmak için x sabit alınıp $r = 0$ dan $r = R$ 'ye kadar bu ifadenin integrali alınır. Böylece,



Şekil 23.18 Düzgün yüklü R yarıçaplı bir disk. Eksen üzerindeki bir P noktasındaki elektrik alanı eksen boyunca olup disk düzlemine diktir.

$$\begin{aligned} E &= k_e x \pi \sigma \int_0^R \frac{2r dr}{(x^2 + r^2)^{3/2}} \\ &= k_e x \pi \sigma \int_0^R (x^2 + r^2)^{-3/2} d(r^2) \\ &= k_e x \pi \sigma \left[\frac{(x^2 + r^2)^{-1/2}}{-1/2} \right]_0^R \\ &= 2\pi k_e \sigma \left(\frac{x}{|x|} - \frac{x}{(x^2 + R^2)^{1/2}} \right) \end{aligned}$$

Bu sonuç x 'in bütün değerleri için geçerlidir. Eksen üzerinde diske yakın bir noktadaki alan $R \gg x$ varsayılarak hesaplanabilir; böylece parantez içindeki ifade bir olur:

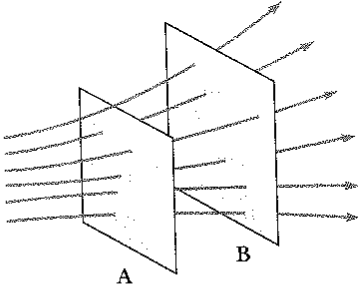
$$E \approx 2\pi k \sigma = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Burada $\epsilon_0 = 1/(4\pi k)$ boş uzayın elektriksel geçirgenliğidir. Bundan sonraki bölümde görüleceği üzere, düzgün yüklü sonsuz bir tabakanın elektrik alanı için de aynı sonuç elde edilir.

23.6 ELEKTRİK ALAN ÇİZGİLERİ

Elektrik alan desenlerini gözönünde canlandırmanın uygun bir yolu, doğrultusu her noktada elektrik alan vektörü ile aynı olan çizgiler çizmektir. **Elektrik alan çizgileri** denilen bu çizgiler uzayın herhangi bir bölgesinde elektrik alanına aşağıdaki biçimde bağlıdır:

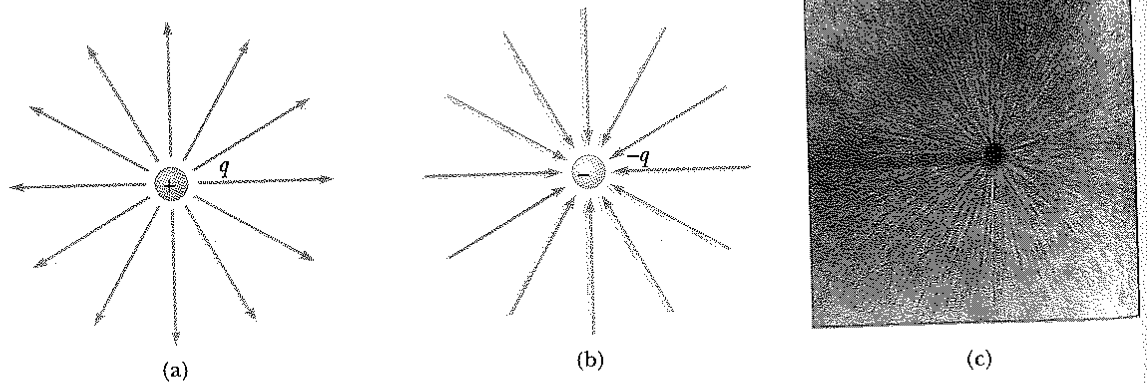
- **E** elektrik olan vektörü, elektrik alan çizgisine her noktada teğettir.
- Alan çizgilerine dik olan birim yüzeyden geçen çizgilerin sayısı, o bölgedeki elektrik alan büyüklüğüyle orantılıdır. Buna göre, alan çizgileri birbirlerine yakın olduğunda **E** büyük, uzak olduğunda küçüktür.



Şekil 23.19 İki yüzeyden geçen elektrik alan çizgileri. Alanın A yüzeyindeki büyüklüğü B yüzeyinden fazladır.

Bu özellikler Şekil 23.19 da gösterilmiştir. A yüzeyinden geçen çizgi yoğunluğu, B yüzeyinden geçen çizgi yoğunluğundan daha büyüktür. Bu nedenle, A yüzeyindeki elektrik alanı, B dekinden daha şiddetlidir. Üstelik, çizgiler, farklı noktalarda farklı doğrultularda olduklarından alan düzgün değildir.

Artı bir tek nokta yükü temsil eden elektrik alan çizgileri, Şekil 23.20a da gösterilmiştir. Bu iki boyutlu çizimde, yalnızca, nokta yükün bulunduğu düzlemdeki alan çizgileri gösterilmiştir. Alan çizgileri, yükten radyal olarak bütün doğrultularda dışarı doğru yönelmişlerdir. Buna göre şekildeki gibi düz



Şekil 23.20 Bir nokta yükün elektrik alan çizgileri. (a) Artı bir nokta yük için alan çizgileri yarıçap boyunca (radyal olarak) dışarı doğrudur. (b) Eksi bir nokta yük için çizgiler yarıçap boyunca içeri doğrudur. Şekiller yalnızca yükün bulunduğu düzlemdeki alan çizgilerini göstermektedir. (c) Karanlık bölgeler, merkezdeki yüklü küçük bir iletkenin elektrik alanında dizilmiş yağda asılı küçük iplik parçalarıdır. (Fotograf, Princeton Üniversitesinden Harold M. Waage'ın izniyle).

tekerlek yerine bir küre oluşturan çizgilerin zihinde canlandırılması gerekir. Bu alana konulan artı bir deneme yükü nokta yükçe itileceğinden, alan çizgileri artı nokta yükten yarıçap boyunca dışarı doğru yönelmişlerdir. Bir eksi nokta yükün elektrik alan çizgileri yüke doğru yönelmiştir (Şek. 23.20b). Her iki durumda da alan çizgileri yarıçap boyunca olup sonsuza dek uzanırlar. Kaynak yüke yaklaştıkça, alan şiddetinin artmasının göstergesi olarak alan çizgileri sıklaşırlar.

Elektrik alan çizgilerinin çizim kuralları şunlardır:

- Alan çizgileri bir artı yükten çıkıp bir eksi yükte son bulmalıdır.
- Bir artı yükten ayrılan veya bir eksi yüke ulaşan alan çizgilerinin sayısı yük miktarıyla orantılıdır.
- İki alan çizgisi birbirini kesemez.

Elektrik alanın alan çizgileriyle anlatımı Coulomb yasası kullanılarak elde edilen Eş. 23.4 ile bağdaşır mı? Bu soruyu yanıtlamak için yükle aynı merkezli r yarıçaplı bir küre yüzeyi düşünölsün. Simetriden dolayı, küre yüzeyinin her yerinde elektrik alan büyüklüğü aynıdır. Yükten çıkan N alan çizgisi sayısı, küresel yüzeyden geçenlerin sayısına eşittir. Bunun için, küre yüzeyinde birim yüzölçüme düşen alan çizgisi sayısı $N/4\pi r^2$ dir (burada küre yüzeyinin tüm yüzölçümü $4\pi r^2$ dir). E , birim yüzeye düşen alan çizgilerinin sayısı ile orantılı olduğundan, E , $1/r^2$ şeklinde değişir. Bu, sonuç Eş. 23.4'e uygundur.

Göröldüğü üzere elektrik alan çizgileri elektrik alanın nitel anlatımında kullanılırlar. Bu modelin bir sorunu, yükler için belli sayıda alan çizgilerinin çizilmesidir. Buna göre alan sanki belli doğrultularda etkiliymiş gibi görünür. Bu gerçek değildir. Oysa, alan her noktada vardır ve süreklidir. Bu modelin başka bir sorunu da, üç boyutlu bir olayın anlatımında, alan çizgilerinin iki boyutlu çiziminin kullanılmasından dolayı, yanlış izlenimler elde edilmesi tehlikesidir. Çizerek ya da bakarak elektrik alan çizgileriyle uğraşıldığında her zaman bu eksikliklerin bilincinde olunmalıdır.

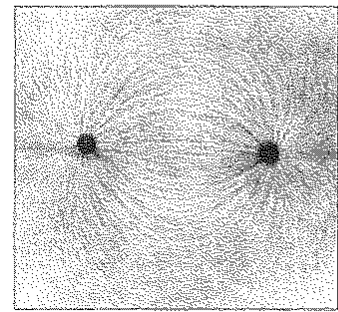
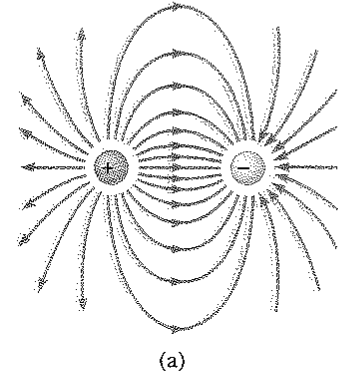
Herhangi artı yüklü bir cisimden çıkan alan çizgilerinin sayısı $C'q$ ve eksi bir cisimde sona eren alan çizgilerinin sayısı $C'|q|$ olarak alınır. Burada C' rastgele bir orantı sabitidir. C' bir kez seçildikten sonra alan çizgilerinin sayısı sabit olur. Örneğin, cisim 1 ve cisim 2 nin yükleri Q_1 ve Q_2 ise, alan çizgi sayılarının oranı $N_2/N_1 = Q_2/Q_1$ dir.

Aynı büyüklükte zıt işarette iki nokta yükün (elektrik dipolü) elektrik alan çizgileri Şekil 23.21 de gösterilmiştir. Yükler eşit büyüklükte olduğundan, artı yükten çıkan alan çizgilerinin sayısı, eksi yükte son bulanların sayısına eşit olmalıdır. Yüklere yakın yerlerde alan çizgileri hemen hemen radyaldır. Yüklere arasındaki yüksek çizgi yoğunluğu, bu bölgede elektrik alanının şiddetli olduğunu gösterir.

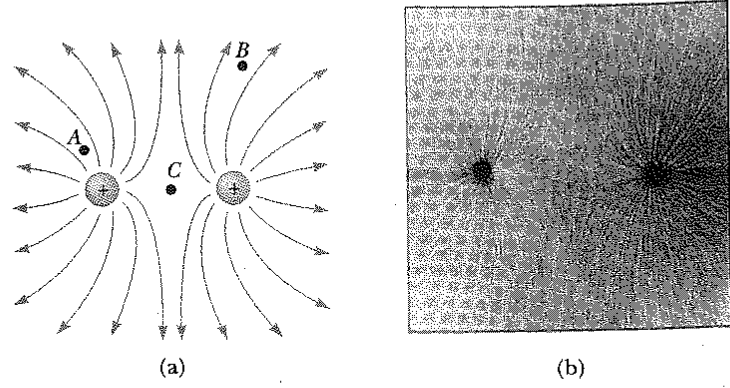
Eşit yüklü artı iki nokta yükün çevresindeki elektrik alan çizgileri Şekil 23.22 de gösterilmiştir. Burada da, yüklere yakın yerlerde alan çizgileri hemen hemen yarıçap boyuncadır. Yükler eşit büyüklükte olduğundan her bir yükten aynı sayıda alan çizgisi çıkar. Yüklere çok uzaklarda alan, $2q$ 'lük bir tek nokta yükün alanına yaklaşık olarak eşittir.

Son olarak, Şekil 23.23 te, artı $+2q$ yükü ile, eksi $-q$ yükünün elektrik alan çizgileri çizilmiştir. Bu durumda, $+2q$ yükünden ayrılan alan çizgilerinin sayısı, $-q$ yüküne girenlerin iki katıdır. Buna göre, artı yükten ayrılan alan çizgilerinin yalnız yarısı eksi yüke girmektedir. Öteki yarı, sonsuzda bulunduğu varsayılan eksi bir yükte son bulmaktadır. Yüklere arasındaki uzaklığa göre

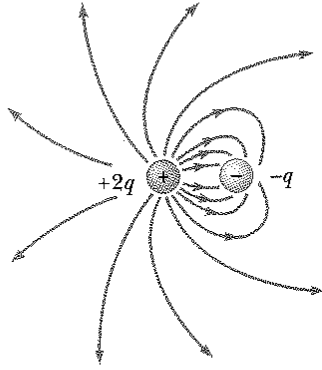
Elektrik alan çizgilerinin çizim kuralları



Şekil 23.21 (a) Eşit büyüklükte zıt işaretli iki nokta yükün (elektrik dipolü) elektrik alan çizgileri. Artı yükten çıkıp eksi yüke ulaşan alan çizgilerinin sayısı aynıdır. (b) Koyu çizgiler bir dipolün elektrik alanıyla sıralanan yağda asılı küçük ipli parçalarıdır. (b, Princeton Üniversitesinden Harold M. Waage'in izniyle)



Şekil 23.22 (a) İki artı nokta yükün elektrik alan çizgileri (A , B ve C nin yerleri Sinama Sorusu 23.5'de tartışılmıştır). (b) Eşit büyüklükte iki artı yükün oluşturduğu, elektrik alanıyla yağda asılı küçük iplik parçaları. (Fotograf, Princeton Üniversitesinden Harold M. Waage'in izniyle)



Şekil 23.23 Bir $+2q$ nokta yükü ile başka bir $-q$ nokta yükünün elektrik alan çizgileri. $+2q$ yükünden çıkan iki alan çizgisi biri $-q$ yükünde son bulur.

Sinama Sorusu 23.5

Şekil 23.22a'daki A , B ve C noktalarındaki elektrik alan büyüklüğünü büyükten başlayarak sıralayınız.

23.7

DÜZGÜN BİR ELEKTRİK ALANINDA YÜKLÜ PARÇACIKLARIN HAREKETİ

q yüklü m kütleli bir parçacık bir \mathbf{E} elektrik alanına konulduğunda, yüke etkileyen elektrik kuvveti $q\mathbf{E}$ dir. Bu, parçacığa etkileyen tek kuvvetse, net kuvvet olacağından parçacığı hızlandırır. Bu durumda parçacığa Newton'un ikinci yasası uygulandığında

$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E} = m\mathbf{a}$$

elde edilir. Buna göre parçacığın ivmesi

$$\mathbf{a} = \frac{q\mathbf{E}}{m} \quad (23.7)$$

olur: \mathbf{E} düzgün ise (yani, doğrultu ve büyüklüğü sabitse), ivme sabittir. Parçacığın yükü artı ise ivme elektrik alanıyla aynı, eksi ise zıt yöndedir.

ÖRNEK 23.10 Hızlanan Bir Artı Yük

Şekil 23.24 teki gibi, x eksenini doğrultusunda olan düzgün bir \mathbf{E} elektrik alanında, m kütleli artı q nokta yükü, durgun halden serbest bırakılıyor. Hareketi anlatınız.

Çözüm İvme sabittir ve $q\mathbf{E}/m$ ile verilir. Hareket x boyunca basit doğrusal bir harekettir. Bu nedenle bir boyutta ki kinematik denklemler uygulanabilir (bakınız Bölüm 2):

$$x_s = x_i + v_{xi}t + \frac{1}{2}a_x t^2$$

$$v_{xs} = v_{xi} + a_x t$$

$$v_{xs}^2 = v_{xi}^2 + 2a_x(x_s - x_i)$$

$x_i = 0$ ve $v_{xi} = 0$ alındığında:

$$x_s = \frac{1}{2}a_x t^2 = \frac{qE}{2m} t^2$$

$$v_{xs} = a_x t = \frac{qE}{m} t$$

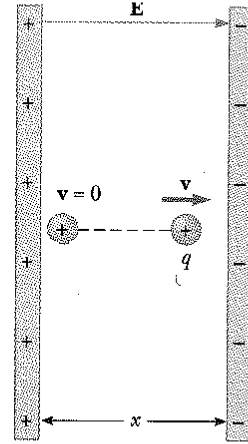
$$v_{xs}^2 = 2a_x x_s = \left(\frac{2qE}{m}\right)x_s$$

Yükün $x = x_s - x_i$ yolunu aldıktan sonraki kinetik enerjisi:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{2qE}{m}\right)x = qEx$$

ile verilir. Elektriksel kuvvetin yaptığı iş $F_e x = qEx$ ve $W = \Delta K$

olduğundan, bu sonuç iş enerji teoreminden de çıkarılabilir.



Şekil 23.24 Düzgün bir E elektrik alanında, artı bir q nokta yükü, alan doğrultusunda sabit bir ivme kazanır.

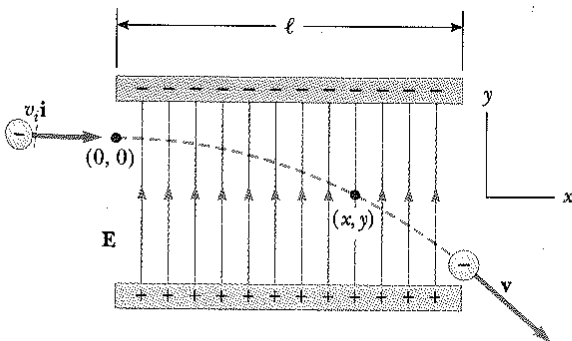
Zıt işaret yüklü iki düz metal tabaka arasındaki bölgede elektrik alanı yaklaşık olarak düzgündür (Şek. 23.25). $-e$ yüklü bir elektronun bu alana v_i ilk hızıyla yatay olarak fırlatıldığı varsayalım. Şekil 23.25 deki E elektrik alanı artı y doğrultusunda olduğundan, elektronun ivmesi eksi y doğrultusundadır. Yani,

$$\mathbf{a} = -\frac{eE}{m} \mathbf{j} \quad (23.8)$$

İvme sabit olduğundan, $v_{xi} = v_i$ ve $v_{yi} = 0$ olmak üzere, iki boyuttaki kinematik denklemleri (bakınız Bölüm 4) uygulanabilir. Elektrik alanında, bir t süresi kaldıktan sonra elektronun hız bileşenleri,

$$v_x = v_i = \text{sabit} \quad (23.9)$$

$$v_y = a_y t = -\frac{eE}{m} t \quad (23.10)$$



Şekil 23.25 İki yüklü tabakanın oluşturduğu düzgün bir elektrik alanına, bir elektron yatay olarak fırlatılıyor. Elektron aşağı doğru bir ivme kazanır (E ye zıt yönde) ve tabakalar arasındayken parabolik bir yörünge izler.

olur. Elektron, elektrik alanında t süresi kaldıktan sonra koordinatları

$$x = v_i t \quad (23.11)$$

$$y = \frac{1}{2} a_y t^2 = -\frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2 \quad (23.12)$$

dir. Eş. 23.11 deki $t = x/v_i$ değeri, Eş. 23.12 de yerine konulduğunda y nin x^2 ile orantılı olduğu bulunur. Buna göre yörünge bir paraboldür. Elektron düzgün elektrik alan bölgesinden çıkınca Newton'un birinci yasasına uyarak $v > v_0$ hızıyla Şekil 23.25 deki v doğrultusunda bir doğru boyunca hareketini sürdürür.

Elektron üzerindeki kütle-çekim kuvveti önemsenmedi. Atomik parçacıklar için bu iyi bir yaklaşımdır. 10^4 N/C luk bir elektrik alanında eE elektrik kuvvetinin, büyüklüğünün mg kütleçekim kuvvetinin büyüklüğüne oranı bir elektron için 10^{14} , bir proton için 10^{11} mertebesindedir.

ÖRNEK 23.11 Hızlandırılmış Bir Elektron

Bir elektron, Şekil 23.25 teki gibi, $v_i = 3 \times 10^6$ m/s ve $E = 200$ N/C olmak üzere, düzgün bir elektrik alan bölgesine giriyor. Plakaların yatay eni $\ell = 0,100$ m dir. (a) Elektronun elektrik alanındaki immesini bulunuz.

Çözüm Elektronun yükü $1,60 \times 10^{-19}$ C ve kütlesi $m = 9,11 \times 10^{-31}$ kg olduğundan, Eş. 23.8 den

$$\begin{aligned} a &= -\frac{eE}{m} \mathbf{j} = -\frac{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(200 \text{ N/C})}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}} \mathbf{j} \\ &= -3,51 \times 10^{13} \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

(b) Elektronun, elektrik alanı ne kadar sürede geçtiğini bulunuz?

Çözüm Elektrik alanı boyunca yatay uzunluk $\ell = 0,100$ m dir. Eş. 23.11 de $x = \ell$ olarak elektronun elektrik alanından geçtiği süre:

$$t = \frac{\ell}{v_i} = \frac{0,100 \text{ m}}{3,00 \times 10^6 \text{ m/s}} = 3,33 \times 10^{-8} \text{ s}$$

(c) Elektrik alanındayken elektronun y düşey yerdeğiştirilmesi ne kadardır?

Çözüm Eş. 23.12 ve (a) ve (b) şıklarından bulunan sonuçlar kullanılarak;

$$\begin{aligned} y &= \frac{1}{2} a_y t^2 = \frac{1}{2} (-3,51 \times 10^{13} \text{ m/s}^2) (3,33 \times 10^{-8} \text{ s})^2 \\ &= -0,0195 \text{ m} = -1,95 \text{ cm} \end{aligned}$$

buluruz.

Plakalar arasındaki uzaklık bundan daha küçük olursa elektron aru plakaya çarpar.

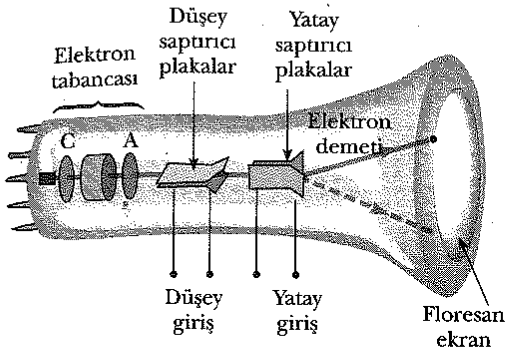
Alıştırma Elektronun elektrik alandan ayrılış hızını bulunuz.

Cevap $3,22 \times 10^6$ m/s.

Katot Işınları Tübü

Yukarıda incelenen örnek katot ışınları tübünün (KIT) bir parçasını açıklar. Şekil 23.26 da gösterilen katot ışınları tübü osiloskoplar, radar sistemleri, televizyon alıcıları, bilgisayar ekranlarında elektronik bilginin görüntülenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. KIT, içinde, elektronların elektrik ya da manyetik alanlarda hızlandırıldıkları ve sapıtıldıkları havası boşaltılmış bir tüptür. Elektron demeti, tübün boyun kısmında bulunan *elektron tabancası* denilen bir aygıtla üretilirler. Bu elektronlar kendi başlarına bırakıldıklarında KIT'nün ön kısmındaki ekrana çarpıncaya dek dosdoğru bir yol izlerler. Tübün "ekran"ı, elektronlarla dövüldüğünde görünür ışık saçan bir maddeyle kaplanmıştır.

Bir osiloskopta tübün boyun kısmında birbirine dik olarak yerleştirilmiş iki plaka takımıyla elektronlar çeşitli doğrultularda sapıtılırlar. (Bir televiz-



Şekil 23.26 Bir katot ışınları tübünün gösterimi. Sıcak C katodundan ayrılan elektronlar A anoduna doğru hızlanırlar. Elektron tabancası elektron demetinin odaklanmasında da kullanılır, plakalar ise demeti saptırır.

yon KIT'de elektron demeti Bölüm 29'da anlatıldığı gibi bir manyetik alanla yönlendirilir.) Plakalardaki yük miktarını denetlemek için bir dış elektrik devresi kullanılır. Yatay saptırıcı plakalardan birine artı ötekine eksi yük konulması plakalar arasında bir elektrik alan oluşturur ve demetin yanlamasına denetimini sağlar. Düşey saptırıcı plakalar da aynı biçimde davranır, yalnız plakalardaki yükün değiştirilmesi demetin düşey sapmasını sağlar.

ÖZET

Elektrik yükleri aşağıdaki önemli özelliklere sahiptir:

- Zıt yükler birbirlerini çekerler, aynı yükler iterler.
- Elektrik yükü korunur.
- Yük kuantumludur, yani, elektron yükünün tam katları olan kesikli yük paketleri şeklinde bulunur.

İletkenler, içlerinde yüklerin serbestçe hareket ettikleri maddelerdir. **Yalıtkanlar**, içlerinde yüklerin serbestçe hareket etmedikleri maddelerdir.

Coulomb yasasına göre, bir q_1 yükünün ikinci bir q_2 yüküne uyguladığı elektrik kuvveti

$$\mathbf{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (23.2)$$

dir. Burada r iki yük arasındaki uzaklık, $\hat{\mathbf{r}}$, q_1 den q_2 yönelik birim vektördür. Coulomb sabiti denilen k_e sabitinin değeri $k_e = 8,9875 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ dir.

Doğada varlığı bilinen en küçük yük miktarı elektron veya protondaki yük-tür, $|e| = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Uzayın bir noktasındaki \mathbf{E} elektrik alanı, o noktaya konulan küçük bir artı deneme yüküne etkiyen \mathbf{F}_e elektrik kuvvetinin, deneme yükünün q_0 büyüklüğüne bölümü olarak tanımlanır:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{q_0} \quad (23.3)$$

Bir q nokta yükünün, yükten r uzaklığında bir noktada oluşturduğu alan

$$\mathbf{E} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (23.4)$$

ile verilir. Burada $\hat{\mathbf{r}}$, yükten söz konusu noktaya doğru yönelmiş birim vektördür. Elektrik alanı, artı yük için yarıçap boyunca yükten dışarı doğru, eksi yük için ise, radyal olarak yüke doğru yönelir.

Bir nokta yükler topluluğunun elektrik alanı, üstüste binme ilkesi kullanılarak bulunabilir. Yani, bir noktadaki toplam elektrik alanı, bütün yüklerin o noktadaki elektrik alanlarının vektörel toplamıdır:

$$\mathbf{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \quad (23.5)$$

Sürekli bir yük dağılımının bir noktadaki elektrik alanı

$$\mathbf{E} = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (23.6)$$

dir. Burada dq , yük dağılımının bir ögesindeki yük, r ise bu ögeden ilgilenilen noktaya olan uzaklıktır.

Elektrik alan çizgileri uzayın herhangi bir bölgesinde elektrik alanını belirtirler. Alan çizgilerine dik birim yüzeyden geçen çizgi sayısı, o bölgedeki \mathbf{E} nin büyüklüğüyle orantılıdır.

Bir \mathbf{E} elektrik alanında hareket eden m kütleli, q yüklü bir parçacığın ivmesi:

$$\mathbf{a} = \frac{q\mathbf{E}}{m} \quad (23.7)$$

Problem Çözümünde İpuçları

Elektrik Alanının Bulunması

- **Birimler:** $k_e (= 1/4\pi\epsilon_0)$ Coulomb sabitinin kullanıldığı hesaplarda, yükler coulomb, uzunluklar metre olmalıdır.
- **Nokta yüklerin elektrik alanının hesabı:** Verilen bir noktadaki toplam elektrik alanını bulmak için, önce her bir yükün bu noktada oluşturduğu elektrik alanlarını hesaplayınız. Bu noktadaki bileşke alan her bir yükün oluşturduğu alanların vektörel toplamıdır.
- **Sürekli yük dağılımları:** Sürekli yük dağılımının işe karıştığı problemlerle karşılaşıldığında, bir noktadaki toplam elektrik alanını hesaplamakta kullanılan vektör toplamlarının yerini vektör integralleri almalıdır. Yük dağılımı sonsuz küçük parçalara ayrılır ve vektör toplamı, bütün yük dağılımı üzerinden integral alınarak gerçekleştirilir. 23.7 den 23.9 a kadar olan örnekleri yeniden gözden geçirmelisiniz.
- **Simetri:** İster bir nokta yükler dağılımı, isterse sürekli bir yük dağılımı olsun hesapları basitleştirmek için sistemdeki simetriden yararlanınız.

SORULAR

1. Kuru günlerde elbisenizi karanlıkta çıkarırken kıvılcım çıktığını görür (ya da duyarsınız). Açıklayınız.
2. Yüklerin neden çoğunlukla elektronlarca taşındığını atomik bakış açısından açıklayınız.
3. Sürtmeyle bir balon eksi yüklenir ve sonra duvara tutu-

nur. Bu, duvarın artı yüklü olduğu anlamına mı gelir? Sonunda balon neden düşer?




4. Bir iple asılmış yüksüz hafif bir metal küre, yüklü lâstik bir çubuğa doğru çekilmiştir. Küre çubuğa değdikten sonra çubuk tarafından itilir. Açıklayınız.

5. Nötr bir atomla ne demek istendiğini açıklayınız.
6. Kurutucudan çıkarılan bazı çamaşırlar neden birbirlerine ve bedenimize yapışırlar?
7. Yalıtılmış bir taburede oturan bir kimsenin elinde tuttuğu topraktan yalıtılmış büyük bir metal küre bir elektrostatik üreteçle yükleniyor. Bunun böyle yapılması neden güvenlidir? Yüklendikten sonra başka bir kimsenin küreye dokunması neden emniyetli olamaz?
8. Newton'un $F_g = Gm_1m_2/r^2$ kütle-çekim yasasıyla, $F_e = kq_1q_2/r^2$ Coulomb yasası arasındaki benzerlikler ve farklar nelerdir?
9. Birisi insanların yere kütleçekimiyle değil de, elektrik kuvvetleriyle bağlandığını belirten bir kuram öne sürse, bunun yanlış olduğunu nasıl kanıtlarsınız?
10. Bir elektrik alanını bir kütleçekim alanından deneysel olarak nasıl ayırt edersiniz?
11. Elektron artı, proton eksi yüklenmiş olsaydı yaşam farklı olur muydu? İşaret seçiminin fiziksel ve kimyasal etkileşimlerle bir ilgisi var mıdır? Açıklayınız.
12. Elektrik alanı tanımlanırken deneme yükünün çok küçük olduğunu (yani, $q \rightarrow 0$ için \mathbf{F}_e/q nun limitini almayı) belirtmeye neden gerek duyulur?
13. a yarıçaplı yüklü iki küre arasında $r > 2a$ uzaklığı bulunmaktadır. Kürelerin herbirine etkiyen kuvvet Coulomb yasasıyla verilebilir mi? Açıklayınız. (Yol gösterme: Kütle çekimiyle ilgili olarak Bölüm 14'e bakınız.)
14. Bir yük dağılımı için nokta yük yaklaşıklığı yapmak ne zaman geçerlidir?
15. Boş uzayda elektrik alanı var olabilir mi? Açıklayınız.
16. Elektrik alan çizgilerinin birbirlerini hiç bir zaman neden kesmeyeceklerini açıklayınız. (İpucu: \mathbf{E} nin her noktada tek bir doğrultusu olmalıdır.)
17. Bir serbest elektronla, bir serbest proton aynı elektrik alanına konulduklarında, parçacıklara etkiyen elektrik kuvvetlerini ve ivmelerini karşılaştırınız.

18. r nin sıfıra gitmesi durumunda bir nokta yükün elektrik alan büyüklüğüne ne olduğunu açıklayınız.
19. Eksi bir yük, elektrik alanının düşey doğrultuda yukarı yönlendirilmiş olduğu bir uzay bölgesine konuluyor. Bu yüke etkiyen elektrik kuvveti hangi doğrultudadır?
20. Bir $4q$ yükü, bir $-q$ yükünden r uzaklığındadır. $4q$ yükünden çıkan elektrik alan çizgileri sayısını, $-q$ yüküne girenleriyle karşılaştırınız.
21. Şekil 23.23 te $+2q$ yükünden çıkan fazlalık alan çizgileri nerede son bulurlar?
22. Aralarında d uzaklığı bulunan eşit iki nokta yük ele alınsın. Üçüncü bir deneme yüküne hangi noktada (∞ dışında) etkiyen net kuvvet sıfırdır?
23. Şekil 23.17 deki artı yüklü halka yakınındaki P noktasına, bir $-q$ nokta yükü konuluyor. $x \ll a$ ise, durgun halden serbest bırakılan nokta yükün hareketini anlatınız.
24. Doğrusal, yüzeysel ve hacimsel yük yoğunlukları arasındaki farkları açıklayınız ve kullanılmalarına örnekler veriniz.
25. Şekil 23.25 deki elektron, elektrik alanı, \mathbf{E} ile bir açı yapacak biçimde, her hangi bir \mathbf{v}_i hızıyla atıldığında yörüngesi yine parabol mu olur? Açıklayınız.
26. Bilindiği üzere, bazı durumlarda yakınlarında toprağa yıldırım düşmesi sırasında insanların elbiselerinin parçalandığı gözlenmiştir. Bunun niçin olabileceğini açıklayınız.
27. Bir televizyon anteninin metal destek çubuğuna topraklama teli neden bağlanmalıdır?
28. İnce bir alüminyum yaprak bir tahta çubuğa sarılıyor. Artı yüklü bir çubuk yaprağa yaklaştırıldığında yaprağın iki parçası birbirinden ayrılır. Niçin? Yaprakta ne tür bir yük bulunmaktadır?
29. Bir cismi sürtmeyle nemli bir günde elektrikle yüklemek, kuru günden neden daha zordur?

PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorca; \square = Bu problemin tam çözümü Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzu'nda bulunabilir

WEB = Çözüm <http://www.saunderscollege.com/physics/> de bulunabilir  = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir  = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir  = Sayısal/sembolik problem çifti

Kesim 23.1 Elektrik Yüklerinin Özellikleri

Kesim 23.2 Yalıtkanlar ve İletkenler

Kesim 23.3 Coulomb Yasası

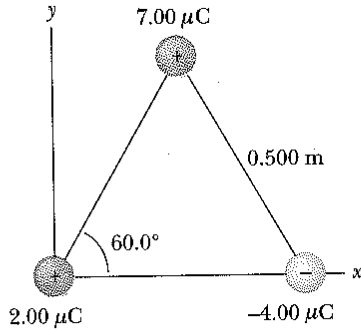
1. (a) 10 g kütleli elektrikçe nötr gümüş küçük bir toplu iğnedeki elektronların sayısını hesap ediniz. Bir gümüş atomunda 47 elektron bulunmaktadır ve molar kütlesi 107,87 g/mol'dür. (b) İğneye, net yük 1 mC oluncaya dek elektronlar katılmaktadır. İğnede başlangıçta bulunan her 10^9 elektrona karşılık kaç elektron eklenmiştir?
2. (a) Bir molekülde iki proton birbirinden $3,80 \times 10^{-10}$ m uzaktadırlar. Protonlardan birinin ötekisine uyguladığı elektrik kuvveti bulunuz.
(b) Bu kuvvetin büyüklüğü iki proton arasındaki

kütleçekim kuvvetine göre nedir? (c) Bu iki parçacık arasındaki kütleçekim kuvvetinin büyüklüğe elektrik kuvvetine eşit olması için parçacığın yükünün kütlelerine oranı ne olmalıdır?

- WEB 3. Richard Feynman bir keresinde, birbirinden kol uzaklığında duran, üzerlerinde protonlara göre %1 elektron fazlalığı bulunan iki kişi arasındaki itme kuvvetinin dünya ağırlığında bir cismi kaldırmaya yeterli olacağını söylemişti. Bu savı doğrulamak için büyüklük merteye hesabını yapınız.
4. Kütleleri 10,0 g olan gümüş iki küçük küre arasındaki uzaklık 1,00 m'dir. Küreler arasında $1,00 \times 10^4$ N (yaklaşık bir ton) luk bir çekim kuvveti oluşturmak için kürelerin birinden diğerine aktarılması gereken

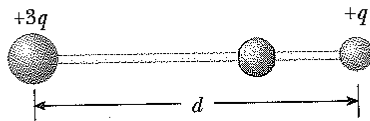
elektron yüzdesini hesaplayınız. (Bir gümüş atomunun elektron sayısı 47 dir. Bir gramdaki atom sayısı, Avogadro sayısının gümüşün molar kütlesine 107,87g/mol bölümüdür).

5. 1,00 g hidrojenin elektron ve protonlara ayrıldığı varsayılın. Protonların dünyanın kuzey, elektronların ise güney kutbuna konuldukları düşünölsün. Dünya üzerinde ortaya çıkacak olan, sıkıştırma kuvveti ne kadardır?
6. Özdeş küçük iki iletken küre merkezi arasındaki uzaklık 0,3 m'dir. Küreleden birine 12 nC ötekisine -18 nC yük veriliyor. (a) Kürelerden birinin ötekine uyguladığı elektrik kuvvetini bulunuz, (b) Küreler iletken bir telle bağlanıyor. Denge kurulduktan sonra küreler arasındaki elektrik kuvvetini bulunuz.
7. Şekil 23.27 deki gibi, üç nokta yük bir eşkenar üçgenin köşelerinde bulunuyor. $7 \mu\text{C}$ luk yük üzerindeki net elektrik kuvvetini hesaplayınız.



Şekil P23.7 Problem 7 ve 15

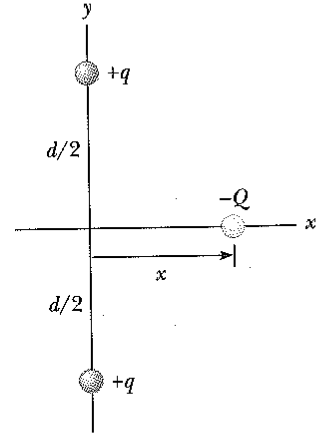
8. Başlangıç noktasından $x = d$ noktasına dek uzanan yatay yalıtkan bir çubuğun uçlarında artı $3q$ ve q yüklü iki küçük boncuk bulunuyor, Şekil 23.8. Küçük yüklü üçüncü bir boncuk çubuk üzerinde serbestçe kayabiliyor. Denge halinde üçüncü yükün yerini bulunuz. Kararlı bir şekilde dengede kalabilir mi?



Şekil P23.8

9. **Tarama Problemi.** Bohr hidrojen atomu kuramında bir elektron bir proton çevresinde $0,529 \cdot 10^{-10}$ m yarıçaplı dairesel bir yörüngede dolar. (a) Elektron ve proton arasındaki elektrik kuvveti bulunuz. (b) Bu kuvvet elektronun merkezci ivmesini sağlıyorsa elektronun hızı ne kadardır?

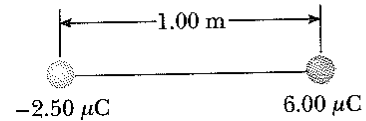
10. **Tarama Problemi.** $+q$ yüklü iki özdeş nokta yük uzayda d aralıklarla sabitleştirilmiştir. m kütleli üçüncü bir $-Q$ nokta yükü, iki sabit yükün ortadikmesi üzerinde orta noktasından x uzaklığında durmakta olup serbestçe hareket edebilmektedir (Şekil P23.10). (a) x, d 'ye göre küçük olduğunda $-Q$ 'nun ortadikme üzerinde basit harmonik hareket yapacağını gösteriniz. Bu hareketin periyodunu bulunuz. (b) $-Q$ yükü, orta nokadan $a \ll d$ uzaklığında serbest bırakıldığında, iki sabit yükün orta noktasına ulaşınca hızı ne olur?



Şekil P23.10

Kesim 23.4 Elektrik Alanı

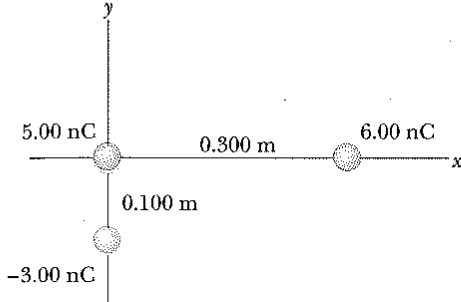
11. (a) Bir elektron ve (b) bir protonun ağırlığını dengeleyecek elektrik alanının büyüklük ve doğrultusunu bulunuz. (Tablo 23.1 deki verileri kullanınız.)
12. Net yükü $24,0 \mu\text{C}$ olan bir cisim, düşey doğrultuda 610 N/C luk düzgün bir elektrik alanına konuluyor. Bu cisim, bu elektrik alanında "askıda kalırsa" kütlesi ne kadardır?
13. Şekil P23.13'de elektrik alanın sıfır olduğu (sonsuz dışında) noktayı bulunuz.



Şekil P23.13

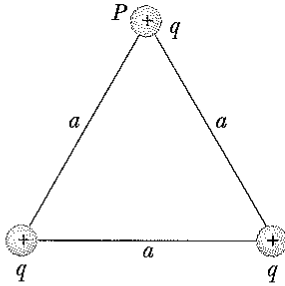
14. Bir uçak 2000 m yükseklikteki bir fırtına bulutu içinden geçmektedir. (Hava akımı, girdap ve olası bir elektrik boşalması nedeniyle bunun yapılması çok tehlikelidir.) Bulut içinde 3000 m de $+40 \text{ C}$ luk, 1000 m de ise -40 C luk bir yük toplanması varsa, uçağın bulunduğu yerdeki E elektrik alanı ne kadardır?

15. Şekil 23.17 deki gibi, üç yük bir eşkenar üçgenin köşelerindedir. (a) $2 \mu\text{C}$ luk yükün konumunda, $7 \mu\text{C}$ ve $-4 \mu\text{C}$ luk yüklerden ileri gelen elektrik alanını hesaplayınız. (b) (a) da bulduğunuz cevabı kullanarak $2 \mu\text{C}$ luk yüke uygulanan kuvveti hesaplayınız.
16. Üç nokta yük Şekil P23.16'daki gibi düzenlenmiştir. (a) 6 nC ve -3 nC yüklerinin birlikte başlangıç noktasında oluşturdukları elektrik alan vektörünü bulunuz. (b) 5 nC yüküne etkiyen vektör kuvvetini bulunuz.



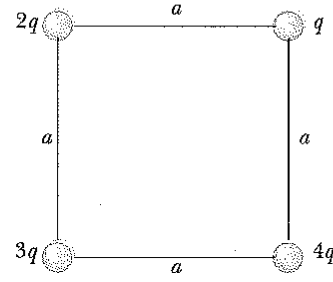
Şekil P23.16

17. Şekil 23.17 deki gibi, üç eşit artı q yükü, a kenarlı bir eşkenar üçgenin köşelerindedir. (a) Elektrik alanını üç yükün oluşturduğu varsayıldığında elektrik alanın sıfır olduğu (sonsuz dışında) noktayı bulunuz (*İpucu:* Alan çizgilerini yükler düzleminde çiziniz). (b) P noktasında, üçgenin iki taban yükünden ileri gelen elektrik alanının büyüklük ve doğrultusu nedir?



Şekil P23.17

18. $2,00 \mu\text{C}$ luk iki nokta yük x ekseninde bulunmaktadır. Bunlardan birisi $x = 1,00 \text{ m}$ de, ötekisi ise $x = -1,00 \text{ m}$ dedir. (a) y ekseninde $y = 0,500 \text{ m}$ de elektrik alanını bulunuz. (b) y ekseninde $y = 0,500 \text{ m}$ ye konulan $-3,00 \mu\text{C}$ luk yüke etkiyen elektrik kuvvetini hesaplayınız.
19. Dört nokta yük Şekil P23.19'daki gibi a kenarlı bir karenin köşelerindedir. (a) q yükünün konumundaki elektrik alanının doğrultu ve büyüklüğünü bulunuz. (b) q ya etkiyen bileşke kuvvet ne kadardır?
20. q yüklü noktasal bir parçacık xy düzleminde (x_0, y_0) noktasında bulunuyor. Bu q yükünün (x, y) nokta-



Şekil P23.19

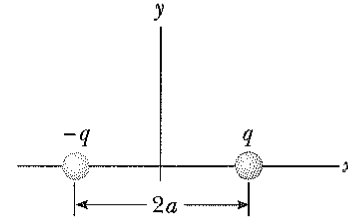
sında oluşturduğu elektrik alanının x ve y bileşenlerinin

$$E_x = \frac{k_e q (x - x_0)}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^{3/2}}$$

$$E_y = \frac{k_e q (y - y_0)}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^{3/2}}$$

olduğunu gösteriniz.

21. Şekil P23.21'deki elektrik dipolü göz önüne alınsın. x ekseninde uzak bir noktada elektrik alanının $E_x \approx 4k_e qa/x^3$ olduğunu gösteriniz.



Şekil P23.21

22. Q/n yükünde n eşit artı noktasal yükün R yarıçaplı bir daire çevresine yerleştirildiği düşünölsün. (a) Daire merkezinden geçen daire düzlemine dik doğru üzerinde daire merkezinden x uzaklığındaki bir noktada elektrik alanının E büyüklüğünü hesaplayınız. (b) Bu sonucun Örnek 23.8'de bulunanla aynı olmasının nedenini açıklayınız.
23. x ekseninde başlangıç noktasından $a, 2a, 3a, 4a \dots$ uzaklıklarında bulunan sonsuz sayıda özdeş q yükü göz önüne alınsın. Bu yük dağılımının başlangıç noktasında oluşturduğu elektrik alanı ne kadardır? *İpucu:*

$$1 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{4^2} + \dots = \frac{\pi^2}{6}$$

olmasından yararlanınız.

Kesim 23.5 Sürekli Bir Yük Dağılımının Elektrik Alanı

24. 14 cm uzunluğunda düzgün yüklü bir çubuğun toplam yükü $-22 \mu\text{C}$ dur. Çubuk ekseninde, çubuğun merkezinden 36 cm uzaklıkta elektrik alanının büyüklük ve doğrultusunu bulunuz.

25. Sürekli doğrusal bir yük x eksenı boyunca $x = +x_0$ dan artı sonsuza kadar uzanmaktadır. Bu doğrusal (çizgisel) yük, düzgün dağılımlı olup doğrusal yük yoğunluğu λ_0 dır. Elektrik alanının başlangıç noktasındaki büyüklüğü ve doğrultusu nedir?

26. Çizgisel bir yük, $x = +x_0$ dan artı sonsuza kadar uzanmaktadır. Çizgisel yük yoğunluğu $\mu = \lambda_0 x_0/x$ ise, başlangıç noktasındaki elektrik alanını bulunuz.

27. Düzgün yüklü 10,0 cm yarıçaplı bir halkanın toplam yükü $75,0 \mu\text{C}$ dur. Halka ekseninde, halka merkezinden (a) 1,00 cm, (b) 5,00 cm, (c) 30,0 cm ve (d) 100 cm uzakta elektrik alanını bulunuz.

28. Düzgün yüklü bir halkanın ekseninde en büyük alan şiddetinin $x = a/\sqrt{2}$ de (bakınız Şek. 23.17) $Q/(6\sqrt{3} \pi \epsilon_0 a^2)$ değerinde olduğunu gösteriniz.

29. 35,0 cm yarıçaplı düzgün yüklü bir diskin yüzey yük yoğunluğu $7,90 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2$ dir. Disk ekseninde disk merkezinden (a) 5,00 cm, (b) 10,0 cm, (c) 50,0 cm ve (d) 200 cm uzaklıkta elektrik alanı hesaplayınız.

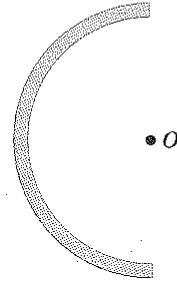
30. Düzgün yüklü bir diskin eksenindeki bir noktada elektrik alanının tam ifadesi Örnek 23.9 da çıkarılmıştır. $+5,20 \mu\text{C}$ 'luk yükün düzgün dağıldığı $R = 3,00 \text{ cm}$ yarıçaplı bir disk ele alınır. (a) Örnek 23.9 sonucunu kullanarak ekseninde, merkezden 3,00 mm uzakta bir noktadaki elektrik alanını hesaplayınız. Bu sonucu $E = \sigma/2\epsilon_0$ yakınlardan yaklaşıklığından hesaplanan alanla karşılaştırınız. (b) Örnek 23.9 sonucunu kullanarak, eksen üzerinde disk merkezinden 30,0 cm uzaklıktaki bir noktada elektrik alanını hesaplayınız. Bunu, diski 30 cm uzakta $+5,20 \mu\text{C}$ luk nokta bir yük gibi alarak elde edilen elektrik alanıyla karşılaştırınız.

31. R yarıçaplı Q yüklü, düzgün yük dağılımlı bir diskin eksenı üzerindeki elektrik alanı Örnek 23.9 da hesaplandı. Elektrik alanının, R ye göre büyük x uzaklıklarında bir $Q = \sigma \pi R^2$ nokta yüküne yaklaştığını gösteriniz. (İpucu: Önce $x/(x^2 + R^2)^{1/2} = (1 + R^2/x^2)^{-1/2}$ olduğunu gösteriniz ve $\delta \ll 1$ için $(1 + \delta)^n \approx 1 + n\delta$ binom açılımını kullanınız.)

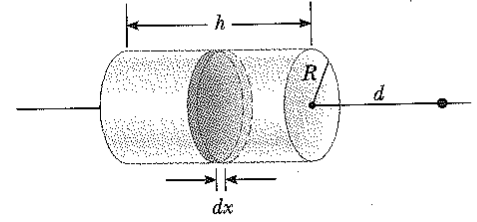
32. m kütleli bir yalıtkan köpük (styrofoam) parçasının net yükü $-q$ dur. Bu köpük parçası, düzgün yüzey yüklü, büyükçe bir yatay plâstik tabakanın merkezi üzerinde havada asılı kalmaktadır. Plâstik tabakanın yüzeyce yük yoğunluğu ne kadardır?

WEB 33. 14,0 cm uzunluğunda düzgün yüklü yalıtkan bir çubuk, Şekil P23.33 deki gibi yarım daire şeklinde bükülüyor. Çubuğun toplam yükü $-7,50 \mu\text{C}$ ise yarım dairenin O merkezinde elektrik alanının büyüklük ve doğrultusunu bulunuz.

34. (a) Yarıçapı R , yüksekliği h , toplam yükü Q olan dairesele dik bir silindir tabakası düzgün yüklü olsun. Şekil P23.34'teki gibi silindirin sağ yanından d uzaklığındaki bir noktada elektrik alanını bulunuz. (İpucu: Örnek 23.8'in sonucunu kullanarak silindiri halka yüklerden oluşmuş gibi düşününüz.) (b) Aynı bo-



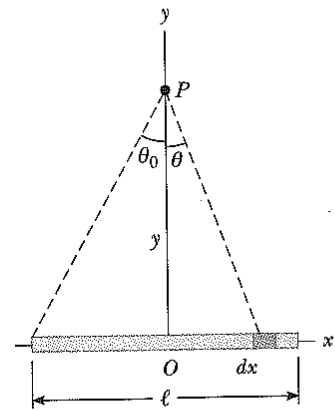
Şekil P23.33



Şekil P23.34

yutlarda aynı yükü hacmine düzgün olarak dağılmış içi dolu bir silindir göz önüne alınsın. Örnek 23.9'un sonucunu kullanarak aynı noktada oluşturduğu alanı bulunuz.

35. Boyca düzgün yük yoğunluğu λ olan ℓ uzunluklu ince bir çubuk Şekil P23.35'deki x eksenı üzerindedir. (a) Çubuğun ortadikmesinde çubuktan y uzaklığında P deki elektrik alanının x bileşeninin olmadığını ve $E = 2k\lambda \sin\theta_0/y$ ile verildiğini gösteriniz. (b) (a) şıkında bulunan sonucu kullanarak sonsuz uzunluklu bir çubuğun alanının $E = 2k\lambda/y$ olduğunu gösteriniz. (İpucu: Önce, λdx yükü olan dx uzunluğunda bir öğeden ileri gelen P deki alanı hesaplayınız. Sonra $x = y \tan\theta$ ve $dx = y \sec^2\theta d\theta$ 'den yararlanarak, x yerine θ alıp θ üzerinden integral alınız.)

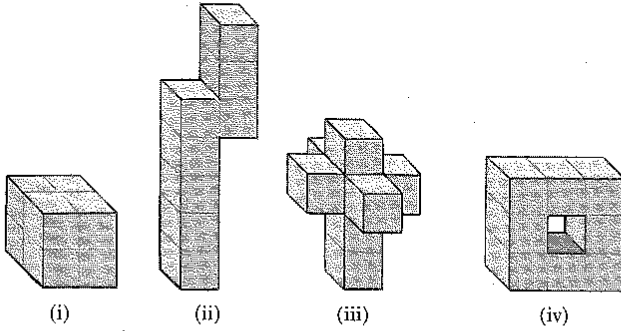


Şekil P23.35

36. 2,50 cm yarıçaplı ve 6 cm uzunluklu dolu üç plâstik silindirden, biri (a) yüzeyinin her yerinde 15 nC/m^2

lik düzgün yük yoğunluğunu, ikincisi (b) aynı düzgün yük yoğunluğunu bükülmüş yanal yüzeyinde, üçüncüsü (c) plâstığın her yerinde 500 nC/m^3 lük düzgün yük yoğunluğu bulunduruyor. Her silindirin yükünü bulunuz.

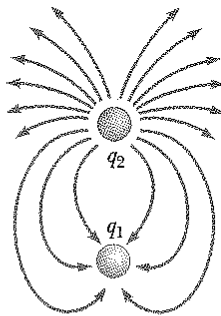
37. 3 cm kenar uzunluklu sekiz dolu plâstik küp Şekil P23.37'deki (i, ii, iii, iv) cisimlerini oluşturmak üzere birbirlerine yapıştırılıyorlar (a) Cisimlerin düzgün hacimsel yük yoğunluğu 400 nC/m^3 ise, cisimlerin her birinde yük ne kadardır? (b) Cisimlerin açıkta bulunan yüzeylerinde düzgün yüzeysel yük yoğunluğu $15,0 \text{ nC/m}^2$ ise, cisimlerin her birinde yük ne kadardır? (c) Dik yüzlerin birleştiği kenarlarda düzgün boyca yük yoğunluğu $80,0 \text{ pC/m}$ ise cisimlerin her birinde yük ne kadardır?



Şekil P23.37

Kesim 23.6 Elektrik Alan Çizgileri

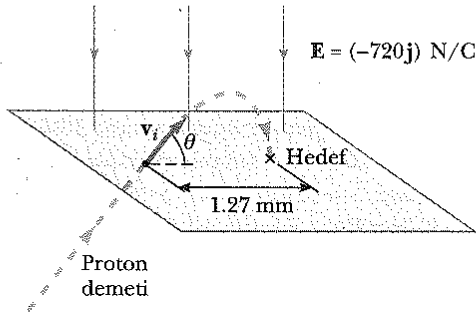
38. Artı yüklü bir diskin birim alan başına yüzeysel yük yoğunluğu, Örnek 23.9 da belirtildiği gibi düzgündür. Elektrik alan çizgilerini diskin merkezinden geçen ve disk düzlemine dik olan bir düzlemde çiziniz.
39. Düzgün boyca yük yoğunluğu olan sonlu büyüklükteki eksi yüklü bir çubuğun elektrik alan çizgilerini çubuğu içeren bir düzlemde çiziniz.
40. Şekil 23.40 da aralarında küçük bir uzaklık bulunan iki nokta yükün elektrik alan çizgileri görülmektedir. (a) q_1/q_2 oranını bulunuz. (b) q_1 ve q_2 nin işaretlerini bulunuz.



Şekil P23.40

Kesim 23.7 Yüklü Parçacıkların Düzgün Bir Elektrik Alanında Hareketi

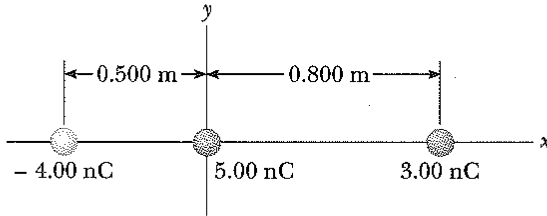
41. Bir elektron ile bir proton 520 N/C luk bir elektrik alanına durgun olarak konuluyorlar. Herbirinin serbest bırakıldıktan 48 nano saniye sonraki hızını hesaplayınız.
42. Bir proton $E = -6 \times 10^5 \text{ i N/C}$ luk düzgün bir elektrik alan bölgesine artı x doğrultusunda fırlatılıyor. Proton duruncaya dek 7 cm gidiyor. (a) protonun ivmesini (b) ilk hızını ve (c) proton duruncaya kadar geçen süreyi bulunuz.
43. Bir proton 640 N/C luk düzgün bir elektrik alanında durgun halden hızlanıyor. Bir süre sonra hızı $1,20 \times 10^6 \text{ m/s}$ oluyor (ışığın hızından çok az olduğu için göreceli değildir). (a) Protonun ivmesini bulunuz. (b) Protonun bu hızı ulaşması için ne kadar süre geçmiştir? (c) Bu sürede ne kadar yol almıştır? (d) Bu süre sonunda kinetik enerjisi ne kadardır?
44. Bir parçacık demetindeki elektronların her birinin kinetik enerjisi $1,60 \times 10^{-17} \text{ J}$ dür. Bu elektronları 10,0 cm lik bir uzaklıkta durduracak olan elektrik alanının büyüklük ve doğrultusunu bulunuz.
- WEB 45. Bir parçacık demetinin elektronlarının her birinin kinetik enerjisi K dır. Bu elektronları bir d uzaklığında durduran elektrik alanının büyüklük ve doğrultusu nedir?
46. 1,0 g kütleli artı yüklü bir boncuk, $1,00 \times 10^4 \text{ N/C}$ luk düzgün düşey bir elektrik alanında boşlukta 5,00 m yükseklikten durgun halden düşüyor. Boncuk yere 21,0 m/s hızla çarpıyor. (a) elektrik alanın (yukarı ya da aşağı doğru) doğrultusunu ve (b) boncuktaki yükü bulunuz.
47. Bir proton yatay doğrultuda $4,50 \times 10^5 \text{ m/s}$ lik bir hızla, düşey doğrultulu $9,60 \times 10^3 \text{ N/C}$ luk düzgün bir elektrik alanına giriyor. Kütle çekimsel etkileri önemsemeyerek, (a) protonun yatay olarak 5,00 cm yol alması için geçen süreyi, (b) protonun, yatay olarak 5,00 cm yol alması durumunda düşey yerdeğiştirmesini, ve (c) protonun yatay olarak 5,00 cm yol aldığı durumda hızının yatay ve düşey bileşenlerini bulunuz.
48. Bir elektron, $E = 390 \text{ j N/C}$ luk bir elektrik alan bölgesine yatay üzerinde 30° lik bir açıyla $8,2 \times 10^5 \text{ m/s}$ hızla fırlatılıyor. Kütleçekim etkilerini önemsemeyerek (a) elektronun ilk atıldığı yüksekliğe geri dönmesi için geçen süreyi, (b) elektronun ulaşabildiği en büyük yüksekliği ve (c) en büyük yüksekliğe ulaşta yatay yerdeğiştirmesini bulunuz.
49. Şekil P23.49 daki gibi, protonlar düzgün bir $E = -720 \text{ j N/C}$ elektrik alan bölgesine $v_i = 9,55 \times 10^3 \text{ m/s}$ ilk hızıyla fırlatılıyorlar. Protonların fırlatıldıkları noktadan yatay olarak 1,27 mm uzaklıktaki bir hedefi vurmaları bekleniyor. (a) Vuruşun sağlanacağı iki θ atış açısını ve (b) her iki atış için vuruşa kadar geçen süreyi bulunuz.



Şekil P23.49

EK PROBLEMLER

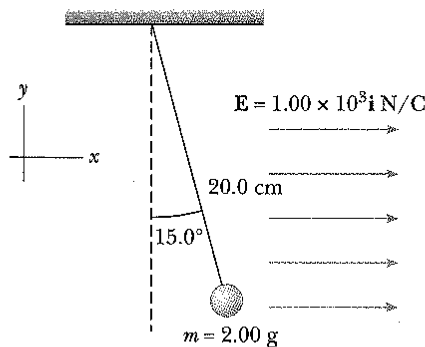
50. Şekil P23.50'deki üç nokta yük x eksenı boyunca dizilmiştir. (a) (2; 0) ve (b) (0; 2) konumlarındaki elektrik alanlarını bulunuz.



Şekil P23.50

51. 4,00 cm aralıklı paralel iki tabaka arasında 640 N/C'luk düzgün bir elektrik alanı bulunuyor. Aynı anda artı tabakadan bir proton, eksi tabakadan bir elektron serbest bırakılıyor. (a) Bu iki yükün birbirlerini geçtikleri noktanın artı tabakaya uzaklığını bulunuz (Proton ve elektron arasındaki elektriksel çekimi önemsemeyiniz) (b) (Na^+) ve (Cl^-) iyonları için (a) yı yineleyiniz.

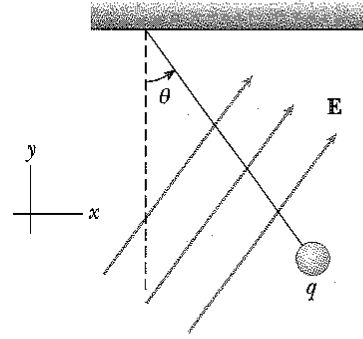
52. Şekil P23.2 deki gibi, 2,00 g lık plâstik küçük bir top 20,0 cm uzunluğunda bir ipe düzgün bir elektrik alanında asılıyor. Top, ipin düşeyle $15,0^\circ$ lik bir açı yapması durumunda dengede ise, topta ne kadar net yük vardır?



Şekil P23.52

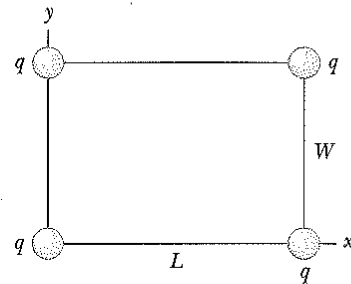
- WEB 53. Şekil P23.53 deki gibi 1,00 g lık yüklü bir mantar top ince bir iplikle düzgün bir elektrik alanının bulunduğu bir bölgede asılıyor. $\mathbf{E} = (3,00\mathbf{i} + 5,00\mathbf{j}) \times 10^5$ N/C olduğunda top $\theta = 37,0^\circ$ de dengede kalıyor. (a) toptaki yükü ve (b) ipteki gerilmeyi bulunuz.

54. Şekil P23.53 gibi m kütleli yüklü bir mantar top ince bir iplikle düzgün bir elektrik alanında asılıdır. A ve B artı sayılar olmak üzere $\mathbf{E} = (A\mathbf{i} + B\mathbf{j})$ N/C olduğunda top θ açısında dengededir. (a) toptaki yükü ve (b) iplikteki gerilmeyi bulunuz.



Şekil P23.53 Problem 53 ve 54

55. Şekil P23.55'teki gibi özdeş dört nokta yük ($q = +10,0 \mu\text{C}$) dikdörtgenin köşelerine konulmuştur. Dikdörtgenin boyutları $L = 60,0$ cm ve $W = 15,0$ cm'dir. Sol alt köşedeki yüke öteki üç yükün uyguladığı net elektrik kuvvetinin büyüklük ve doğrultusunu bulunuz.



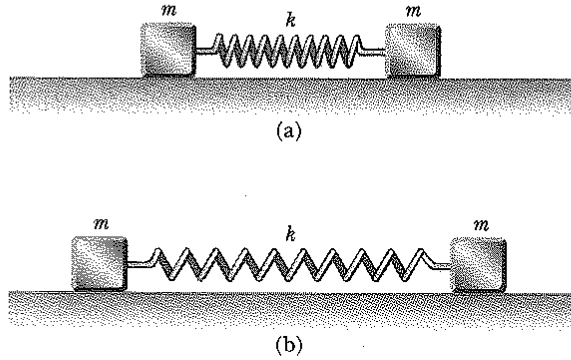
Şekil P23.55

56. Özdeş üç küçük köpük topu (styrofoam) ($m = 2,00$ g), kütlesi önemsenmeyen 50 cm uzunluklu iletken olmayan üç iplikle sabit bir noktaya asılıyorlar. Dengede iken bu üç top, 30 cm kenar uzunluklu bir eş-

kenar üçgen oluşturuyor. Her bir toptaki aynı miktarda olan q yükünü bulunuz.

57. Şekil P23.57a'daki gibi sürtünmesiz yatay bir yüzey üzerinde duran özdeş iki metal parçası, gerilmemiş uzunluğu $0,3$ m ve yay sabiti $k = 100$ N/m olan hafif metal bir yayla birbirlerine bağlıdır. Sisteme yavaşça Q toplam yükü verildiğinde, yay şekil P23.57b'deki gibi $0,4$ m denge uzunluğuna geriliyor. Tüm yükün metal parçalarda bulunduğunu ve bu yüklerin de nokta yük gibi olduğunu varsayarak Q 'nun değerini bulunuz.

58. Şekil P23.57a'daki gibi sürtünmesiz yatay bir yüzey üzerinde duran özdeş iki metal parçası, gerilmemiş uzunluğu L ve yay sabiti k olan hafif metal bir yayla birbirlerine bağlıdır. Sisteme yavaşça bir Q toplam yükü verildiğinde yay Şekil P23.57b'deki gibi L denge uzunluğuna geriliyor. Tüm yükün metal parçalarda bulunduğunu ve bu yüklerin de nokta yük gibi olduğunu varsayarak Q 'nun değerini bulunuz.



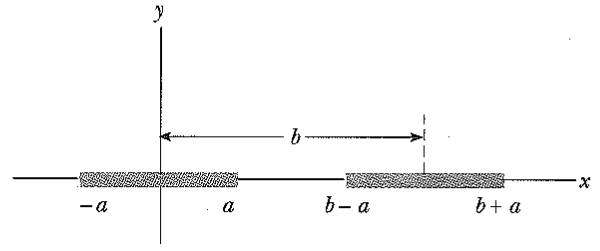
Şekil P23.57 Problem 57 ve 58.

59. $2a$ uzunluğunda özdeş ince çubuklar boylarına düzgün olarak dağılmış eşit $+Q$ yükleri vardır. Çubuklar x eksenini boyunca merkezleri $b > 2a$ olacak şekilde birbirinden ayrılmışlardır (Şekil 23.59). Soldaki çubuğun sağdaki çubuğa uyguladığı kuvvetin büyüklüğünün

$$F = \left(\frac{k_e Q^2}{4a^2} \right) \ln \left(\frac{b^2}{b^2 - 4a^2} \right)$$

ile verildiğini gösteriniz.

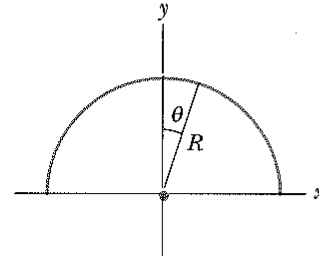
60. Bir parçacığın hızı, ışık hızının onda birinden ya da $3,00 \cdot 10^7$ m/s'den daha küçük olduğunda göreceli olmadığı söylenir. (a) $1,00$ N/C'luk bir elektrik alanında durgun halden harekete geçen bir elektron ne kadar süre göreceli olmayacaktır? (b) Aynı elektrik alanında bir proton ne kadar süre göresiz kalacaktır? (c) Elektrik alanları çoğu kez 1 N/C'dan daha



Şekil P23.59

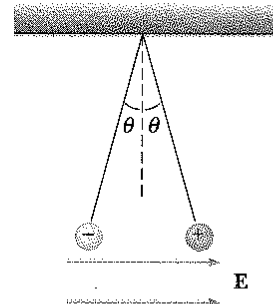
şiddetlidirler. Daha şiddetli bir elektrik alanında yüklü parçacık daha kısa mı yoksa daha uzun süre mi göresiz kalacaktır?

61. Şekil P23.61'deki gibi, artı yüklü bir doğru parçası $R = 60,0$ cm yarıçaplı bir yarı daireye dönüştürülüyor. Yarı daire üzerinde birim uzunluğa düşen yük $\lambda = \lambda_0 \cos \theta$ bağıntısı ile belirtiliyor. Yarı daire üzerindeki toplam yük $12,0 \mu\text{C}$ dir. Yarı dairenin eğrilik merkezine konulan $3,00 \mu\text{C}$ luk bir yüke etkileyen toplam kuvveti hesaplayınız.



Şekil P23.61

62. 2 g kütleli iki küçük küre 10 cm uzunluklu ince ip-liklerle asılıyorlar (Şek. P23.62). Düzgün bir elektrik alanı x doğrultusunda uygulanıyor. Kürelerin yükleri -5×10^{-8} C ve $+5 \times 10^{-8}$ C ise, küreleri $\theta = 10^\circ$ açıda dengede tutabilecek elektrik alan şiddetini bulunuz.



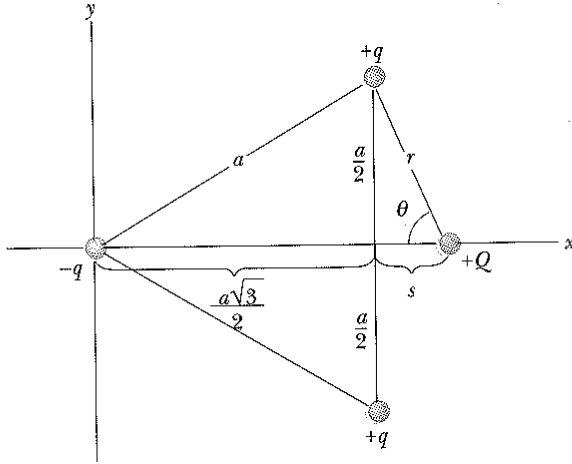
Şekil P23.62

63. m kütleli iki küçük küre, ℓ uzunluklu ipilerle aynı noktaya asılıyorlar. Kürelerden birinin yükü Q ötekini $2Q$ dur. İplerin düşeyle yaptıkları θ_1 ve θ_2 açılarının küçük olduğu varsayalım. (a) θ_1 ve θ_2 birbirlerine nasıl bağlıdır? (b) Küreler arasındaki r uzaklığının

$$r \approx \left(\frac{4k_e Q^2 \ell}{mg} \right)^{1/3}$$

olduğunu gösteriniz.

64. Aynı büyüklükte üç q yükü eşkenar bir üçgenin köşelerine tutturuluyorlar (Şekil P23.64). Dördüncü bir Q yükü, sabit üç yükün uyguladığı kuvvetlerin etkisiyle artı x eksenini boyunca serbestçe hareket etmektedir. Q nun dengede olduğu konumunda s değerini bulunuz.

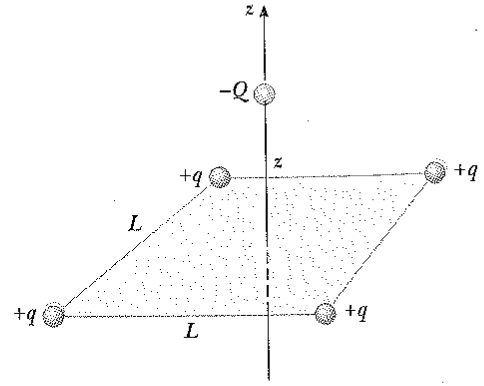


Şekil P23.64

65. **Tarama Problemi.** $+q$ yüklü özdeş dört nokta yük, L kenar uzunluklu bir karenin köşelerine tutturulmuştur. Beşinci bir $-Q$ nokta yükü, karenin merkezinden geçen kare düzlemine dik doğru üzerinde z uzaklığında bulunuyor (Şekil P23.65). (a) $-Q$ ya öteki dört yükün etkidiği kuvvetin

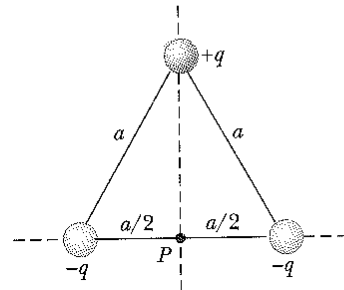
$$\mathbf{F} = - \frac{4k_e q Q z}{\left(z^2 + \frac{L^2}{2} \right)^{3/2}} \mathbf{k}$$

olduğunu gösteriniz. z artı ($-Q$ karenin yukarısında), ya da eksi ($-Q$ karenin altında) olması durumunda bu kuvvet karenin merkezine doğru yöneliktir. z , L 'ye göre küçükse yukarıdaki bağıntı $\mathbf{F} \approx -(\text{sabit}) z \mathbf{k}$ şeklini alır. Bu neden $-Q$ nun hareketinin basit harmonik olması demektir ve $-Q$ nun kütlesi m olsaydı bu hareketin periyodu ne olurdu?



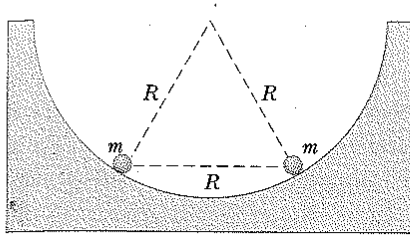
Şekil P23.65

66. **Tarama Problemi.** $2,00 \mu\text{C}$ yüklü $1,00 \text{ g}$ 'lık bir man-tar top, $E = 1,00 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ 'luk aşağıya doğru yönelik düzgün bir elektrik alanı içinde $0,500 \text{ m}$ uzunluklu düşey ince bir ipe asılıdır. Top düşeyden hafifçe sap-tırılırsa bir basit sarkaç gibi salınır. (a) Bu salınımın periyodunu bulunuz. (b) Kütle çekimi (a) daki he-saba katılmalı mıdır? Açıklayınız.
67. Aynı büyüklükte üç q yükü, a kenar uzunluklu bir eş-kenar üçgenin köşelerinde bulunmaktadır, (Şekil P23.67). (a) Eksi yükler ortasında P noktasındaki elektrik alanın büyüklük ve doğrultusunu k , q ve a cinsinden bulunuz. (b) P noktasına konulan her-hangi bir yüke hiç bir kuvvet etkimemesi için bir $-4q$ yükü nereye konulmalıdır? $+q$ yükü ile P noktası ara-sındaki uzaklık bir metre olsun.



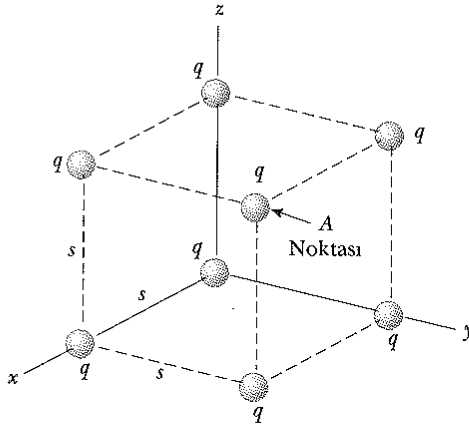
Şekil P23.67

68. m kütleli, q yüklü iki özdeş boncuk, sürtünmesiz ilet-ken olmayan duvarlı Ryarıçaplı yarıküresel bir çana-ğa konulduğunda aralarında R uzaklık oluncaya dek hareket ediyorlar (Şekil P23.68). Her bir boncukta-ki yükü bulunuz.



Şekil P23.68

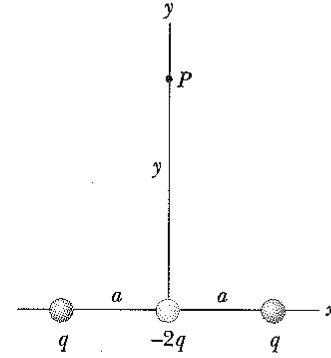
69. Şekil P23.69 daki gibi, q büyüklüklü sekiz nokta yük, s kenar uzunluklu bir kübün köşelerine konuluyor. (a) A noktasındaki yüke, öteki yüklerin uyguladığı bileşke kuvvetin x , y , z bileşenlerini bulunuz. (b) Bu bileşke kuvvetin büyüklük ve doğrultusunu bulunuz.



Şekil P23.69 Problem 69 ve 70

70. Şekil P23.69 daki yük dağılımını ele alınız. (a) Kübün herhangi bir yüzünün merkezinde elektrik alan büyüklüğünün $2,18 k_e q/s^2$ olduğunu gösteriniz. (b) Kübün üst yüzünün merkezindeki elektrik alan doğrultusunu bulunuz.
71. $y = -15,0$ cm doğrusunda $x = 0$ ve $x = 40,0$ cm koordinatlı noktalar arasında $35,0$ nC/m düzgün yoğunluklu doğrusal bir yük bulunuyor. Bunun başlangıç noktasında oluşturduğu elektrik alanını bulunuz.
72. Şekil P23.72 deki gibi q , $-2q$ ve q nokta yükleri x ekseninde bulunmaktadır. y ekseninde bir P ($y \gg a$) noktasında elektrik alanın

$$\mathbf{E} = -k_e \frac{4qa^2}{y^4} \mathbf{j}$$



Şekil P23.72

olduğunu gösteriniz. Aslında iki elektrik dipolden oluşan bu yük dağılımına *elektrik dörktutuplu* (kuadropol) denir. \mathbf{E} nin, dörktutuplu için r^{-4} , çiftkutuplu için r^{-3} ve tekkutuplu için (bir tek yük) r^{-2} şeklinde değiştiğine dikkat edelim.

73. **Tarama Problemi:** Örnek 23.8 deki gibi, toplam artı Q yükü düzgün dağılmış bir halkanın merkezine ek -si yüklü bir q parçacığı konuluyor. Ancak x eksenı boyunca hareket edebilen parçacık, eksen boyunca küçük bir x uzaklığına ($x \ll a$) götürülüp serbest bırakılıyor. Parçacığın

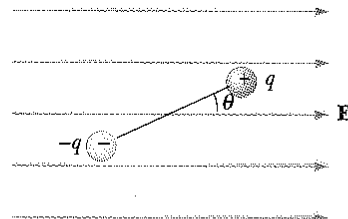
$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_e q Q}{ma^3} \right)^{1/2}$$

frekansıyla basit harmonik hareket yaptığını gösteriniz.

74. **Tarama Problemi:** Düzgün bir elektrik alanında bir elektrik çiftkutuplusunu Şekil P23.74 deki gibi, θ küçük olmak üzere, denge konumundan hafifçe ayırılıyor. Çift kutuplunun (dipolün) eylemsizlik momenti I dir. Çiftkutuplunun bu konumdan serbest bırakılması durumunda, açılal yöneliminin

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2qaE}{I}}$$

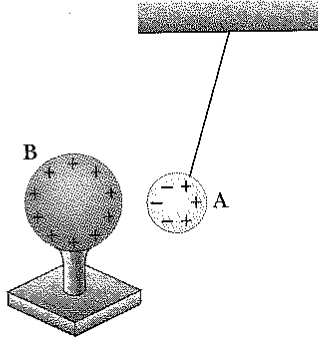
frekansıyla basit harmonik hareket yapacağını gösteriniz.



Şekil P23.74

SINAMA SORULARININ CEVAPLARI

- 23.1** (b) Sürtme sonrası bulunan yük miktarı, sürtme öncesinde bulunan yük miktarı ile aynıdır; yalnızca dağılımı farklıdır.
- 23.2** (d) *A* cismi eksi yüklenebilir, fakat aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere etki ile (indüksiyonla) ayrılan yükler nedeniyle aynı zamanda nötr olabilir.



- 23.3** (b) Newton'un üçüncü yasası uyarınca *B* cisminin *A* cisminde uyguladığı elektrik kuvveti, *A* cisminin *B* cisminde uyguladığı kuvvete büyüklükçe eşit yönce zıttır, yani, $F_{AB} = -F_{BA}$.
- 23.4** Alanı oluşturan kaynak yükün bizim eylemlerimizle etkilenmediğini varsayarsak hiçbir şey. Elektrik alanının ne $+3 \mu C$ 'luk yükten, ne de $-3 \mu C$ 'luk yükten ileri gelmeyip, yalnızca kaynak yükten (bu durumda görülmüyor) ileri geldiğini bilelim.
- 23.5** *A*, *B* ve *C*. Alan çizgileri birbirlerine en yakın olduğundan *A* noktasında alan en büyüktür. *C* noktasında alan çizgilerinin olmayışı elektrik alanının orada sıfır olduğunu gösterir.