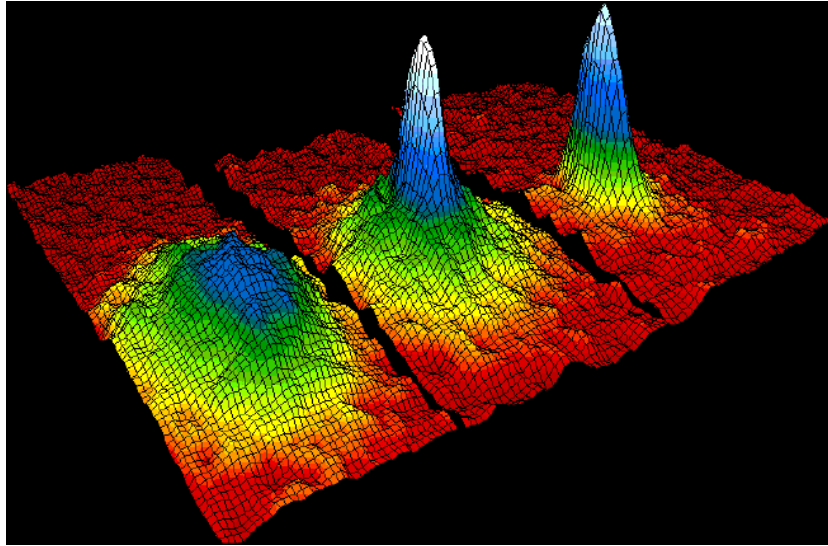




## Fizikos sekcijos užduotis Nr. 4

2020 m. lapkričio 8 d.

- Savo sprendimus atsiųskite iki **2020 m. lapkričio 22 d.** adresu [aleksas+sprendimai@nmakademija.lt](mailto:aleksas+sprendimai@nmakademija.lt) . Laiško temą nurodykite „NMA užduotis Nr. 4“.
- Šios užduoties vertinimai bus pateikti gruodžio 6 d.
- Sprendimus pateikite PDF formatu, pavadinę pagal savo pavardę bei užduoties numerį: *pavardė\_fizika\_4.pdf*.
- Užduoties autorius Aleksas Mazeliauskas



1 pav. Arti absoliutaus nulio atšaldytų atomų pasiskirstymas trijuose dujų debesėliuose. Platus simetriškas pasiskirstymas kairėje rodo įprastą tam tikros temperatūros dujų pasiskirstymą. Aukšta pasiskirstymo smailė dešinėje rodo, kad dujos kondensavosi į Bozė–Einšteino kondensatą. *Anderson et al., Science 269, 198 (1995)*  
<https://doi.org/10.1126/science.269.5221.198>

## 1. Bozė–Einšteino kondensatas

1995 m. trims mokslininkų grupėms vadovaujamoms Eric A. Cornell (JILA), Wolfgang Ketterle (MIT) ir Carl E. Wieman (JILA) pavyko atšaldyti keletą tūkstančių šarminių metalų (rubidžio ir natrio) atomų iki temperatūros kiek mažiau nei  $1 \mu\text{K}$  virš absoliutaus nulio. Taip atšaldytas atomų debesėlis kondensavosi į tą pačią kvantinę būseną ir tapo tarsi vienu objektu – Bozė–Einšteino kondensatu (BEC, angl. *Bose-Einstein Condensate*) (ž.r. 1 pav.). Šį fenomeną dar prieš 70 metų numatė Albertas Einšteinas. Tai buvo iš ties įspūdingas įrodymas, kad mūsų supratimas apie keistus mikroskopinių dalelių elgesio dėsnius yra teisingas. Bozė–Einšteino kondensatas leidžia paaiškinti kitus nepaprastai įdomius reiškinius, kaip superlaidumas ar supertakumas (tai yra irgi žemų temperatūrų reiškiniai). Už šio efekto pademonstravimą eksperimentatoriams buvo įteikta 2001 m. Nobelio fizikos premija<sup>1</sup>.

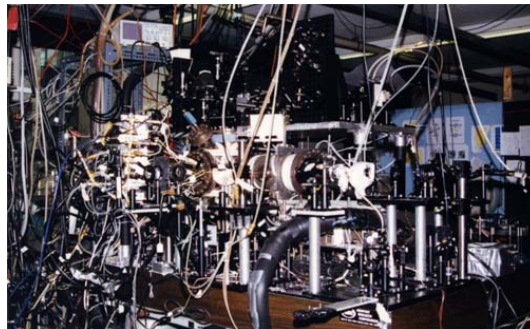
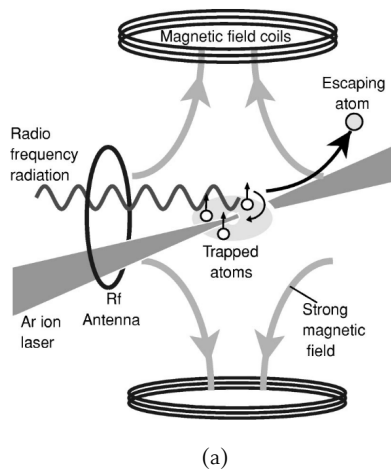
Šis eksperimentas yra reikšmingas ne vien dėl teorijos patvirtinamo, bet ir kaip didžiulis technologinis pasiekimas<sup>2</sup>. Fizikams teko įveikti daugybę kliūčių ir išrasti naujų matavimo technikų šiam tikslui pasiekti. Pirmiausia, norint sukurti BEC buvo būtina atšaldytus atomus išlaikyti dujinėje būsenoje ir neleisti jiems kondensuotis į skystį. Tai yra įmanoma tik naudojant daug kartų už orą retesnes dujas sudarytas iš magnetiškai polirizuotų šarminių metalų atomų. Antra, tokiom žemom temperatūrom pasiekti prirėikė net dviejų šaldymo metodų. Galiausiai, BEC negali būti patalpintas įprastame inde, nes atomai iš karto prikibtų prie indo sienelių. Todėl visas eksperimentas atliekamas vakuuminėje kameroje, o atomų debesėlis yra išlaikomas pakibęs magnetiniais laukais ir lazerio šviesos pagalba.

Technologijos leidusius sukurti BEC šiais laikais yra plačiau naudojamos įvairiuose moksliniuose tyrimuose, ypač, skirtuose suprasti kvantines medžiagos savybes ar bandant sukurti kvantinį kompiuterį. Keletas itin svarbių technologijų yra:

- Lazeriai (amgl. *laser*) – elektromagnetinės spinduliuotės šaltiniai skleidžiantys siauro bangos ilgio diapazono koherentišką spinduliuotę. Tai yra nepamainomi instrumentai, kuriais galima manipuluoti atomus ir molekules.

<sup>1</sup><https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2001/popular-information/>

<sup>2</sup>Nobelio premijos laureato Wolfgang Ketterle pasakojimas: [https://www.rle.mit.edu/cua\\_pub/ketterle\\_group/Projects\\_2002/Pubs\\_02/kett02\\_%20nobel\\_RMP.pdf](https://www.rle.mit.edu/cua_pub/ketterle_group/Projects_2002/Pubs_02/kett02_%20nobel_RMP.pdf)



2 pav. a) Eksperimento schema. Atšaldytų atomų debesėlis magnetinėje gaudyklėje. Radijo bangos leidžia greičiausiems atomams pabėgti iš gaudyklės, taip atvėsinant dujas. Tuo tarpu fokusuotas lazerio spindulys neleidžia atomams priartėti prie gaudyklės centre esančios „skylės“ pro kurią atomai galėtų pabėgti. (b) Reali eksperimento nuotrauka. Vakuuminė kamera apsupta įvairia elektronika. Nuotraukos iš Ketterle laboratorijos (MIT) [https://www.rle.mit.edu/cua\\_pub/ketterle\\_group/](https://www.rle.mit.edu/cua_pub/ketterle_group/)

- Technikos leidžiančios atšaldyti dujas iki itin žemų temperatūrų ( $< 1 \mu\text{K}$ ):
  - Šaldymas stabdant atomus lazeriu (angl. *laser cooling*).
  - Šaldymas leidžiant greitai atomams išgaruoti (angl. *evaporative cooling*).

Taip atšaldytos dujos atskleidžia savo kvantines savybes, kurias galima tyrinėti.

- Atomų gaudyklės skirtos atomų debesėlius išlaikyti vakuume, kad būtų galima atlikti tyrimus
  - Gaudyklės pagrįstos magnetinio lauko gradientu (angl. *magnetic trap*).
  - Lazeriu sukuriamos atomų gardelės ar gaudyklės (angl. *optical trap*).
- Itin žemų temperatūrų matavimas, pagal tai, kaip greitai plečiasi iš gaudyklės paleistos dujos (angl. *time of flight*).

Apie kiekvieną iš šių technologijų galima daug ką papasakoti. Šioje užduotyse susipažinsime tik su keletą idėjų susijusių su Bozė–Einšteino kondensato numatymu ir atradimu.

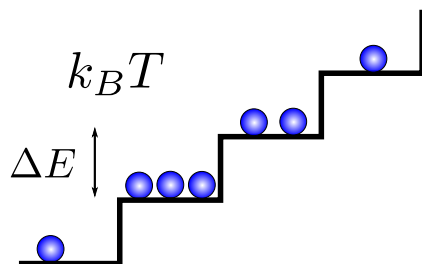
## 2. Dalelių energijos pasiskirstymas žemose temperatūrose

Jau 1900 m. Max Planck iškėlė hipotezę, kad elektromagnetinė spinduliuotė yra **kvantuota**. Tai yra dažnio  $\nu = c/\lambda$  spinduliuotės energija gali turėti tik tokias vertes

$$E(\nu) = N h \nu \quad (1)$$

kur  $N$  yra sveikasis skaičius, o  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$  yra planko konstanta. Tai leido išvesti teisinga temperatūros  $T$  juodojo kūno spinduliuotės spektro formulę, kuri aprašo, pavyzdžiui, reliktinę kosminę spinduliuotę ar Saulės spektrą.

1924 m. indų mokslininkas Satyendra Nath Bose pateikė bendresnį Planko formulės išvedimą pasinaudodamas statistine mechanika. Jis savo straipsnį nusiuntė Albertui Einšteinui, kuris šį išvertė į vokiečių kalbą bei toliau išplėtojo teoriją. Pasak jų, net tik šviesos, tai yra fotonų, bet ir kitų dalelių energija yra kvantuota.



3 pav. Temperatūros  $T$  atomai ant skirtingų energijos laiptų. Ant aukštesnės pakomos esantys atomai turi  $\Delta E$  daugiau energijos. Bozė–Einšteino pasiskirstymas aprašo kiek atomų yra ant kiekvienos pakopos, jei jie yra terminėje temperatūros  $T$  pusiausvyroje.

Atomų energija  $E$ , kaip 3 pav. pavaizduotos laiptų pakopos, gali turėti tik tam tikras diskrečias vertes (kam yra lygi  $\Delta E$  vertė priklauso nuo nagrinėjamos sistemos). Jų išvestas energijų pasiskirstymo dėsnis yra vadinamas Bozė–Einšteino pasiskirstymu (angl. *Bose-Einstein distribution*). Dalelės, kurios tenkiną šį pasiskirstymą yra vadinamos bozonais – Bozės garbei<sup>3</sup>. Skirtumas tarp leistinų energijų  $\Delta E$  yra labai mažais ir įprastomis sąlygomis energijų diskretiškumo nepastebime. Tačiau, jei kūnai atšaldomi iki labai žemų temperatūrų, energijų diskretiškumas turi svarbių pasekmių.

Temperatūra yra ne kas kitas, nei atomų kinetinė energijos matas. Terminėje pusiausvyroje vidutinė energija tenkanti vienam laisvės laipsniui yra lygi

$$\langle E \rangle = \frac{1}{2} k_B T, \quad (2)$$

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$  yra Boltzmano konstanta. Kuo atomai juda greičiau tuo temperatūra yra aukštesnė (yra ant aukštesnių laiptų pakopų). Taigi dujas šaldant vis daugiau atomų turi užimti vis žemesnes ir žemesnes energijos būsenas. Galiausiai atomai nukrenta iki pačios žemiausios leistinos energijos būsenos (apatinės energijos laiptų pakopos). Aukštose temperatūrose tokių atomų žemiausioje būsenoje nėra daug, bet kai masės  $m$  atomai atšąla žemiau kritinės temperatūros

$$T_c \approx 0.084 \frac{h^2}{k_B m} \left( \frac{N}{V} \right)^{2/3} \quad (3)$$

didelė visų atomų  $N$  dalis nusėda arba kondensuojasi į žemiausios energijos būseną – susidaro **Bozė–Einšteino kondensatas**.

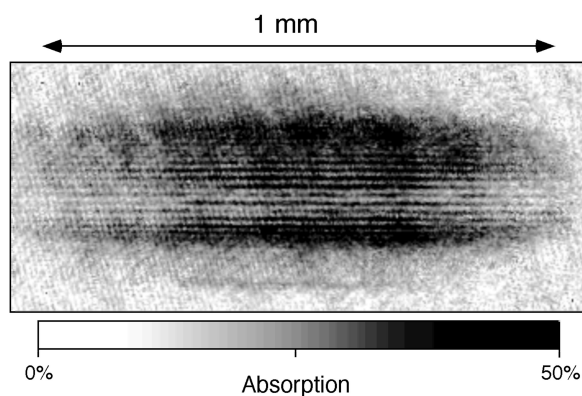
Labai žemose temperatūrose ( $T < T_c$ ) atomų skaičius  $n_0$  ant žemiausios energijos pakopos yra

$$\frac{n_0}{N} \approx 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^{3/2}. \quad (4)$$

Kaip matome  $T_c$  yra tuo didesnė, kuo dujų tankis  $N/V$  yra didesnis. Tačiau esant dideliui dujų tankiui dėl tarpusavio sąveikų jos virstu skysčių. Norint pasiekti BEC reikia kad dujos labai mažai tarpusavyje sąveikautų, todėl jų tankis negali būti didelis. Tipinė BEC temperatūra yra labai maža, (nuo 2  $\mu\text{K}$  iki 500 nK). Atomų tankis yra  $10^{20} - 10^{21} \text{ m}^{-3}$ , o visame dujų debesėlyje yra nuo kelių tūkstančių iki keleto milijonų atomų.

Jei dujų debesėlis yra atšaldomas iki temperatūros žemiau  $T_c$ , didelė visų atomų dalis yra toje pat nulinės energijos būsenoje. Būtent čia ir pasireiškia atomų energijų diskretiškumas, nes tarp žemiausios galimos energijos būsenos ir aukštesnės energijos pakopos tiesiog nėra vietos.

<sup>3</sup>Egistuoja kita dalelių grupė vadinama fermionais, kurios tenkiną kitokį pasiskirstimą, bet jų šioje užduotyje nenagrinėsime. Svarbu tik paminėti, kad fermionų pora elgiasi kaip bozonas, todėl vandenilio atomas sudarytas iš protono ir elektrono (dviejų fermionų) yra bozonas.



4 pav. Akimi matomi kvantinė atomų prigimtis – BEC interferencija. Nuotraukos iš Ketterle laboratorijos (MIT) [https://www.rle.mit.edu/cua\\_pub/ketterle\\_group/](https://www.rle.mit.edu/cua_pub/ketterle_group/)

### 3. Neatskiriamos dalelės

Mes patys ir visi mus supantys daiktai yra sudaryti iš daugybės mažų dalelių – molekulių. Iš chemijos žinome, kad molekulės yra sudarytos iš nedidelio skaičiaus skirtingų atomų – tiek kiek jų yra periodinėje elementų lentelėje. Žmogaus kūne dominuoja vandenilio, deguonies ir anglies atomai. Skirtingos atomų kombinacijos sukuria didžiulę molekulių įvairovę. Iš jų susidaro įvairios ląstelės, iš ląstelių audiniai ir organai, o iš jų – ir mes patys.

Akivaizdu, kad visi žmonės, kad ir panašūs, visada šiek tiek skiriasi. Net identiški dvyniai nėra visiškai identiški. Tačiau toks įprastas sugebėjimas atskirti vieną objektą nuo kito negalioja dalelėms. Atomai ir juos sudarančios dar elementaresnės dalelės yra ne tik panašios, bet yra iš ties identiškos, *neatskiriamos* (angl. *indistinguishable*). Viso tos pačios rūšies dalelės yra neatskiriamos ir visos jų savybės yra identiškos. Jos gali skirtis tik, pavyzdžiui, savo energija, pozicija, judėjimo kryptimi ir pan. Kitaip sakant nėra jaunesnių ar senesnių elektronų, didesnių ar mažesnių fotonų.

Faktas, kad dalelės yra neatskiriamos turi svarbių pasekmių fizikoje. Kol dalelės yra skirtingose energijos būsenose, pavyzdžiui, juda skirtingais greičiais, dar galima kalbėti apie pavienes daleles (dalelė judanti į kairę nėra tapati dalelė, kuri juda į dešinę). Tačiau, jei visi atomai patenka į tą pačią energijos būseną, kaip kad nutinka BEC atveju, nebeįmanoma net kalbėti apie pavienes daleles. Visi toje pačioje energijos būsenoje esantys atomai elgiasi vienodai, tampa tarsi vienu dideliu superatomu. Kai kuriomis savo savybėmis BEC net primena lazerį, kuriame visi fotonai yra tos pačios energijos. Todėl BEC dar vadinamasis atominiu lazeriu (angl. *atom laser*)

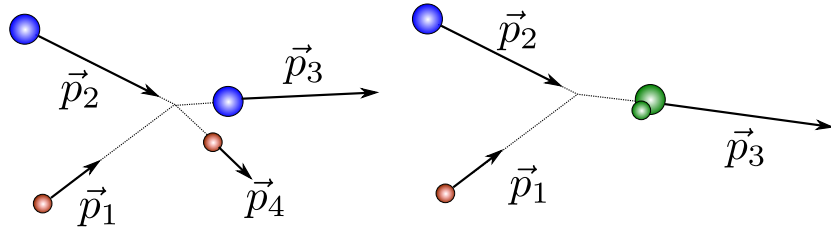
Naudojant BEC buvo pademonstruota daug įspūdingų kvantinių reiškinių, kuriuos praktiškai galima matyti plika akimi. 4 pav. pavaizduota dviejų BEC susidūrimo nuotrauka. Tamsūs regionai rodo kur atomų yra, o šviesūs – kur jų nėra. Susidūrę BEC elgiasi kaip bangos ir interferuoja. Ten kur susidūrusių bangų „keteros“ sutapo, ten matoma daugiau atomų, o ten kur dvi bangos vienas kitą panaikino ir ten lazerio šviesa nebuvo sugerta atomų.

### 4. Šaldymas lazeriu ir judesio kiekio tvermės dėsnis

Dujų temperatūra priklauso nuo atomų judėjimo greičio, todėl dujų šaldymas yra tiesiog atomų stabdymas. Vienas iš tokių stabdymo būdų yra lazerio šviesa. Jam suprasti reikalingas vienas iš tvermės dėsnų. Tvermės dėsniai nusako, kokios dalelių savybės yra tvarios, tai yra nekinta, visuose fizikos reiškiniuose. Energijos ar elektros krūvio tvermės dėsniai yra vieni iš tokių dėsnų pavyzdžių.

**Judesio kiekio tvermės dėsnis** sako, kad uždaroje sistemoje suminis judesio kiekis nekinta. Masės  $m$  dalelė judanti greičių  $\vec{v}$  turi judesio kiekį

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (5)$$



5 pav. Judesio kiekio tvermė tampruose ir netampruose susidūrimuose

Judesio kiekis yra vektorinis dydis ir turi savo kryptį  $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$ , kurias galima išreikšti projekcijomis į koordinatinių ašis. Jei judėjimas vyksta tik viena kryptimi užtenka judesio kiekį apibūdinti vienu skaičiumi, o ženklu nurodyti judėjimo kryptį (kuri usė yra teigiama yra sutarimo reikalas).

Kuo didesnis judesio kiekis, tuo sunkiau sustabdyti dalelę ar pakeisti jos judėjimo kryptį. Jei įvyksta dviejų kūnų susidūrimas (ž.r. 5 pav.), tai judesio kiekio suma turi būti išlaikyta. Jei susidūrimas tamprus (kinetinė energija susidūrimo metu nepakinta), tai

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4. \quad (6)$$

Net jei susidūrimas nėra tamprus ir susidūrę kūnai sukimba (dalis kinetinės energijos virsta vidine energija), judesio kiekio tvermė galioja

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 \quad (7)$$

$\vec{p}_3$  yra po susidūrimo susidariusio kūno judesio kiekis.

Judesio kiekis yra fundamentali dalelių savybė ir net masės neturinčios dalelės, kaip fotonas, turi judesio kiekį. Fotono judesio kiekis yra proporcingas jo energijai  $p = h\nu/c$ .

**Šaldymas lazeriu** yra pagrįstas tuo, kad atomai sugėrę fotoną jį vėl išspinduliuoja atsitiktine kryptimi. Jei atomas sugeria ir išspinduliuoja daug fotonų atsitiktine kryptimi, tai išspinduliuotų fotonų judesio kiekio vektorinė suma yra lygi nuliui ir atomas praranda tiek judesio kiekio kiek fotonų sugėrė.

Tarkime, kad pradžioje atomas judėjo greičiu  $v_1$  ir jis sugėrė bei išspinduliuavo į jį priešais keliavusių  $n$  dažnio  $\nu$  fotonų. Jo galutinis greitis tapo  $v_2$ . Pagal judesio kiekio tvermės dėsnį

$$mv_1 - n \frac{h\nu}{c} = mv_2 \quad (8)$$

ir atomas galutinis greitis yra

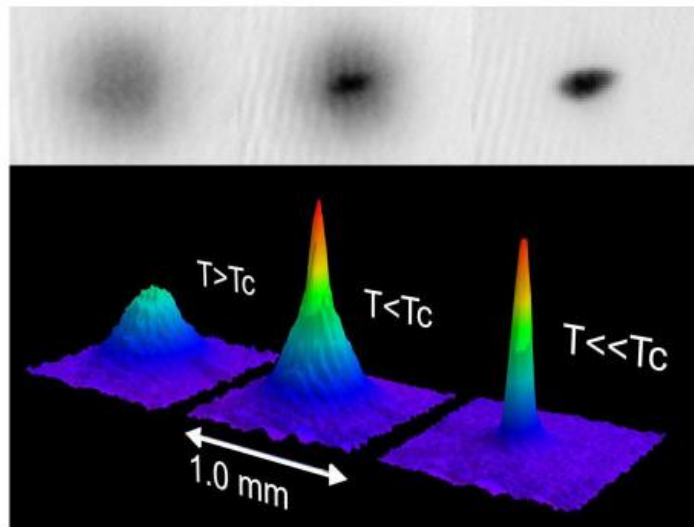
$$v_2 = v_1 - n \frac{h\nu}{cm}. \quad (9)$$

BEC eksperimentuose dujų debesėlis yra iš visų šėšių pusių apšviečiamas lazeriais, kurie atomus lėtina. Svarbu pažymėti, kad lazeriu galima atomus ir greitinti, jei jų ir fotonų judėjimo kryptis sutampa. Kad to būtų išvengiama, yra pasinaudojama tuo, kad atomai sugeria ir išspinduliuoja tik tam tikrų bangos ilgių spinduliuotę. Lazerių šviesos bangos ilgis parenkamas toks, kad tik priešais fotonų srautą judantys atomai juos sugertų. Tuo tarpų „pasroviui“ judantys atomai šių fotonų nesugeria ir nėra jų greitinami. Tai yra įmanoma padaryti dėl Doplerio efekto. Artėjančiam ar tolstančiam atomui tas pats lazeris atrodo esantys skirtingų bangos ilgių. Tik vieno iš šių bangos ilgių šviesą atomas sugeria, o kitos paprasčiausiai nemato.

Šaldymas lazeriu yra ne vienintelis metodas. Dar žemesnės temperatūros pasiekiamos atomus „garinant“. Karštoje arbatoje su garais pabėga pačios energingiausios vandens molekulės, todėl arbata ataušta. Taip ir atomų gaudyklės yra šiek tiek praveriamos, kad patys energingiausi atomai pabėgtų ir likusios dujos dar labiau atvėsta. Šitai buvo pasiektos sąlygos reikalingos sukurti BEC.

## 5. Žemų temperatūrų matavimas

Įdomus klausimas yra kaip išmatuoti itin šaltų dujų temperatūrą. Temperatūros tokios žemos, kad mums įprasti termometrai tokiose temperatūrose nebeveikia. Čia vėl pasitelkiama tai, kad temperatūra yra susijusi su



6 pav. Temperatūrų matavimas jų laisvo skrydžio trukmės metodu. Nuotraukos padarytos po 6 ms laisvo dujų plėtimosi. Viršuje pavaizduotos dvimatės absorbcijos nuotraukos. Apačioje šviesos sugertis paversta į dalelių pasiskirstymą. Kairėje esanti nuotrauka rodo virš kritinės temperatūros buvusių ir išsiplėtusių dujų šešėlį. Smailėje dešinėje rodo Bozė–Einšteino kondensato susidarymą – atomai beveik nebejudą ir net paleisti iš gaudyklės pasilieka susikoncentravę vienoje vietoje. Nuotraukos iš Ketterle laboratorijos (MIT) [https://www.rle.mit.edu/cua\\_pub/ketterle\\_group/](https://www.rle.mit.edu/cua_pub/ketterle_group/)

vidutine dalelių kinetine energija.

Šaldymo metu dujos yra magnetiniais laukais išlaikomos pakibusios nedideliame debesėlyje (žr. 2 pav.). Staiga išjungus magnetinį lauką, dujos pradeda plėsti į vakuumą. Tuomet debesėlį galima „nufotografuoti“ jį staiga apšviečiant lazeriu. Atomai lazerio šviesą sugeria ir palieka tamsų šešėlio atvaizdą (žr. 6 pav.). Kuo šešėlis tamsesnis, tuo daugiau atomų yra toje vietoje ir sugeria daugiau šviesos. Iš debesėlio didumo galima spręsti, kokia yra jo temperatūra. Svarbu pažymėti, kad šis procesas visiškai išsklaido dujas ir jas reikia iš naujo šaldyti. Taigi, kiekviena nuotrauka yra nauja eksperimentas, tačiau palyginę skirtingas nuotraukas galime įsivaizduoti, kaip BEC susikuria dujose.

Jei per tą patį laiką (kelias mili sekundes) dujų debesėlis išsiplėčia daugiau (palieka didesnę šešėlį), jo pradinė temperatūra yra didesnė. 6 pav. pavaizduotose nuotraukose matome, kad aukštesnėje temperatūroje dujų šešėlis yra simetriškas ir platus. Vadinasi atomai turi visokius greičius, o jų vidutinė kinetinė energija yra  $\sim k_B T$ . Tačiau atšaldžius dujas žemiau kritinės temperatūros, jos net ir paleistos iš gaudyklės beveik nebesiplečia, nes atomai yra žemiausioje energijos būsenoje. Juoda dėmė rodo, kur yra susikaupę visi atomai – tai ir yra Bozė–Einšteino kondensato egzistavimo įrodymas.

## 6. Klausimai

Atsakykite žemiau pateiktus klausimus. Kai kuriuos trūkstamus duomenis ar gerai žinomas konstantas turėsite susirasti patys. Nebijokite užrašyti savo samprotavimų, net jei neaišku, kaip tiksliai išspręsti uždavinį.

1. Pasidomėkite kuria nors viena iš pirmame skyriuje minimų technologijų. Parašykite trumpą, iki pusės puslapio ilgio technologijos apibūdinimą, kuris būtų suprantamas Jūsų tėvams arba klasės draugams.
2. Raskite natrio  $^{23}\text{Na}$  atomų vidutinį greitį dujinėje būsenoje  $T = 0^\circ\text{C}$  ir  $T = 1\ \mu\text{K}$  temperatūrose. (Patarimas: atominės dujos turi tris judėjimo laipsnius, todėl vidutinė atomų kinetinė energija yra  $\frac{3}{2}k_B T$ ).

3. Raskite kritinę natrio  $^{23}\text{Na}$  atomų temperatūrą  $T_c$ , jei dujų atominis tankis yra  $10^{20} \text{ m}^{-3}$ .
4. Kokio dydžio yra  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  tankio dujų debesies skersmuo sudaryto iš 700 000 (laikykite, kad dujos sudaro tolygaus tankio rutulį). Palyginkite su 6 pav. pavaizduoto (jau išsiplėtusio) dujų debesies nuotrauką. Ar Jūsų atsakymas neprieštarauja atomų nuotraukoms?
5. Iki kokios temperatūros turi būti atšaldytos dujos, kad net 99% atomų būtų susikondensavę į BEC. Atsakymą išreikšite kritinės temperatūros dalimi.
6. Greičių  $v_1 = 20 \text{ m s}^{-1}$  judantis masės  $m_1 = 15 \text{ kg}$  kūnas netampriai susiduria su priešpriešiais greičiu  $v_2 = 3 \text{ m s}^{-1}$  judančiu  $m_2 = 200 \text{ kg}$  masės kūnu. Apskaičiuoti po susidūrimo susidariusio kūno greitį ir judėjimo kryptį.
7. Kiek  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  bangos ilgio fotonų turi sugerti ir išspinduliuoti rubidžio  $^{87}\text{Rb}$  atomas šaldymo lazeriu metu, kad jo greitis sumažėtų nuo  $10 \text{ cm s}^{-1}$  iki  $1 \text{ cm s}^{-1}$ ?
8. Iš 6 pav. kairėje nufotografuoto dujų debesies nuotraukos įvertinkite, jo temperatūra. Laikykite, kad nuotrauka buvo padaryta po 6 ms nuo magnetinės gaudyklės išjungimo. Nuotraukos matmenys pavaizduoti paveiksle.
9. Ant žemės yra metami du rutuliai: didelis ir mažas, kaip parodyta paveikslėlyje. Turėdami omenyje, kad rutuliai, prieš susidurdami su grindimis laisvai nukrito (be pradinio greičio) 1,5 m, apskaičiuokite, į kokį aukštį pakils mažesnis rutulys. Kamuolių masės: didelio  $m_d = 500 \text{ g}$ , mažo  $m_m = 50 \text{ g}$  ir atitinkamai skersmenys  $D = 20 \text{ cm}$  ir  $d = 50 \text{ mm}$ . Visus sudūrimus laikykite tampriais ir pritaikykite energijos ir judesio kiekio tvermės dėsnius.

