

## Atom Dingin dan Penggunaannya

**Minarni**

*Jurusan Fisika FMIPA*

*Universitas Riau, Pekanbaru 28293*

### **Abstract**

Cooling and Trapping neutral particles or ions using laser beam becomes a new research field in Physics. This field was started in 1970's by Ashkin who demonstrated that a focused laser beam on dielectric particles in a glass cell can attract the particles to the focal area because the potential energy there is lower. Cooling which means to reduce the average thermal velocity of atoms or particles and trapping which means controlling the positions of the atoms can be performed using two kinds of forces from Laser beam *i.e.* scattering force and gradient force. A scattering force is resulted from the laser beam because the laser beam contains photons which have momentum. The gradient force appears because of the gradient of intensity around focal area. One of famous atom traps is Magneto-Optical Trap (MOT). MOT uses Doppler effect for cooling and Zeeman effect for trapping. With this technique, cold atoms with temperature in the order of mikro Kelvin can be produced. Cold atom can be used for many applications such as to make Bose Einstein Condensate (BEC), atom interferometry and atomic clocks.

*Keywords: Cold Atom MOT, Laser*

### **Pendahuluan**

Cahaya merupakan fenomena fisika yang telah dikenal sejak lama. Dan hash kei:,a J.C. Maxwell dan eksperimen H. Hertz 1887 [1] telah dibuktikan bahwa cahaya bersi fat elektromagnetik yaltu merupakan gelombang elektromagnetik yang terdiri dan komponen listrik dan malet. Akan tetapi dalam beberapa eksperinien fisika seperti eksperimen efrk fbtolistrik dan efek Compton, memperlihatkan bahwa cahaya mempunyai sifat seperti partikel sehingga cahaya dianggap mempunyai sifat dualisme. Akan tetapi menurut E.C.Schrodinger yang merupakan bapak pendiri leon kuantum mengatakan tidak hanya cahaya yang mempunyai sifat partikel dan gelombang tetapi objek material juga mempunyai sifat dualisme tersebut. Sifat dualisme cahaya ml kelihatan jika cahaya melewati ruang hampa seperti cahaya matahari sampai ke bumi yang memperlihatkan sifatnya sebagai gelombang. Cahaya akan memperlihatkan sifatnya sebagai partikel dalam proses absorpsi dan einisi cahaya oleh sebuah atom dalam hal ml cahaya dianggap terdiri daii kumpulan partikel yang disebut dengan foton

Interaksi cahaya dengan benda telah menjadi objek pengamatan ilmuwan sejak lama. Tejadinya pelangi ketika hujan gerimis, prisma yang dapat menguraikan cahaya putih menjadi komponen warna pelangi, cahaya matahari disore han, atau laug11 yang biru merupakan hasil dan interaksi cahaya dengan benda. ide bahwa cahaya dapat memberikan gaya dorong atau gaya mekanik pada benda muncul di bidang astronomy ketika pada tahun 1619 Kepler memberi penjelasan kenapa ekor komet selalu menjauhi matahari. Dia mengatakan bahwa tekanan dan cahaya matahari lab yang menyebabkan peristiwa tersebut [2]. Sarannya tersebut ternyata benar 250 tahun kemudian ketika teori elektromagnetik Maxwell berhasil merumuskan tekanan cahaya (radiation pressure) secara kuantitatif. Padatahun 1901-1903, Lebedev, Nichols dan Hull mendemonstrasikan dan mengukur tekanan radiasi pada objek makroskopik secara kuantitatif di laboratonium mereka. Path tahun 1933, Friscli berhasil membuat demostrasi pertama tentang tekanan cahaya pada atom dimana kumpulan atom sodium dapat dibelokkan menggunakan cahaya lampu yang frekuensinya sama dengan frekuensi resonansi dan atom tersebut. Dengan

perkembangan laser, eksperimen dalam mempelajari tekanan cahaya ini semakin berkembang yaitu dengan eksperimen yang dilakukan oleh Ashkin pada tahun 1970 [3]. Eksperimen Ashkin ini mendemonstrasikan bahwa cahaya laser yang difokuskan dapat menarik partikel partikel ke titik fokus laser tersebut dimana energi potensialnya sangat rendah.

Eksperimen Ashkin tersebut memberikan inspirasi para peneliti lainnya dan Ashkin sendiri untuk mengusulkan teknik pendinginan atau perlambatan kecepatan atom dan pemerangkapan atom dengan menggunakan cahaya laser pada tahun 1978 [4]. Pendinginan atau perlambatan kecepatan atom menggunakan dua lintasan cahaya laser yang arahnya berlawanan, dimana frekuensinya di buat sedikit dibawah frekuensi transisi atau resonansi atom tersebut, diusulkan pertama kali pada tahun 1975 oleh Hansch and Schawlow [5], bersamaan dengan usulan pemerangkapan ion-ion oleh Wineland and Dehmelt [6]. Tahun 1970-an merupakan awal dimulainya bidang fisika baru yang disebut dengan Laser Cooling dan Trapping yaitu memperlambat dan memerangkap partikel baik berupa atom netral maupun ion dengan menggunakan cahaya laser.

Kenapa atom atau ion perlu didinginkan dan diperangkap?. Telah diketahui bahwa atom dalam sebuah gas bergerak sangat cepat sekali. Molekul dan atom-atom dalam udara yang berada pada suhu kamar (sekitar 300 K atau 27 °C) dapat bergerak dengan kecepatan 300 meter perdetik hampir sama dengan kecepatan bunyi. Biasanya untuk mengurangi kecepatan termal atom dalam gas, gas tersebut didinginkan dengan menggunakan pendingin. Dari hubungan antara energi kinetik partikel dengan temperatur gas diketahui bahwa kecepatan partikel berbanding lurus dengan akar dari temperatur absolut dari gas tersebut. Jadi untuk mendapatkan kecepatan atom dibawah 1 meter perdetik, gas yang mengandung atom tersebut akan berkondensasi dengan tekanan uap yang sangat rendah sehingga tidak ada lagi atom-atomnya berada pada fase gas. Sebagai contoh, gas Nitrogen mencair pada suhu 77 K. Pada suhu ini, molekul  $N_2$  akan bergerak dengan kecepatan 150 meter perdetik,

sementara Helium cair bergerak pada kecepatan 90 m/s pada suhu 4 K. Dari keadaan ini, studi tentang atom bebas selalu dilakukan dengan menggunakan atom-atom panas atau atom-atom yang kecepatan rata-ratanya sangat tinggi. Pengamatan menggunakan atom dengan kecepatan tinggi sangat menyulitkan. Dalam spektroskopi, ini akan menyebabkan pergeseran dan pelebaran garis spektrum akibat pergeseran Doppler (Doppler Shift) dan dilatasi waktu relativistik. Waktu pengamatan akan menjadi singkat jika menggunakan atom-atom berkecepatan tinggi. Sebagai contoh jika alat eksperimen yang digunakan mempunyai ukuran yang medium, atom dengan kecepatan 300 m/s akan melewati alat yang berukuran 1 meter dalam waktu tiga perseribu detik (3 ms). Efek ini akan sangat jelas jika atom tersebut digunakan dalam jam atom seperti jam atom Cesium. Keakuratan jam tersebut dipengaruhi oleh kecepatan atom. Keinginan untuk mengurangi efek gerak atom dalam spektroskopi dan jam atom merupakan salah satu motivasi yang paling besar untuk mendinginkan atom [4].

Penelitian penelitian selanjutnya dibidang Laser Cooling dan Trapping adalah menemukan berbagai cara untuk memperlambat atau mendinginkan atom baik menggunakan cahaya maupun menggunakan medan magnet saja. S. Chu dan grup penelitiannya menggunakan 3 pasang lintasan cahaya laser yang berlawanan arah untuk mendinginkan dan memerangkap atom-atom Sodium. Kemudian mereka memperbaiki sistem tersebut dengan menambah medan magnet lemah yang dikombinasikan dengan cahaya laser yang berpolarisasi melingkar. Sistem tersebut dinamai *Magneto-optical Trap (MOT)* [7]. Perkembangan yang pesat di bidang pendinginan dan pemerangkapan atom menggunakan cahaya laser ditandai dengan diperolehnya hadiah nobel di bidang ini oleh tiga pakarnya yaitu S. Chu, W. Phillips, and C. Cohen-Tannoudji pada tahun 1997.

Perkembangan yang sangat besar dalam teknik pendinginan dan pemerangkapan ion-ion dan atom netral telah memberi kemajuan yang sangat berarti di bidang fisika atom, molekuler dan optik maupun dibidang ilmu

lainnya yang menggunakan teknik ini. Sejak ditemukan sampai sekarang, pendinginan dan pemerangkapan atom sudah menjadi sesuatu yang rutin bagi lebih 150 laboratorium di dunia [8]. Saat ini, aplikasi atom yang dingin sangat luas sekali seperti pengukuran yang sangat sensitif dan akurat menggunakan interferometer atom, optik yang menggunakan atom sebagai pengganti foton yang disebut atom optik [9,10], komputer kuantum, dan pembuatan Bose-Einstein Condensate (BEC). BEC telah dinyatakan sebagai keadaan benda yang baru selain padat, cair dan gas [11,12,13].

Pada tulisan ini akan dibahas tentang teori yang melandasi teknik dalam menghasilkan atom dingin, kemudian diteruskan dengan teknik-teknik yang telah digunakan untuk menghasilkan atom dingin dilanjutkan dengan beberapa aplikasi atau kegunaan dari atom dingin tersebut.

### Mengontrol Posisi dan Kecepatan Atom

Laser Cooling dan Trapping adalah bidang fisika atom, molekuler dan optik (AMO PHYSICS) yang berkembang sangat pesat sekali sehingga sudah merupakan bidang riset yang multidisiplin. Cooling berarti mengurangi kecepatan rata-rata atom sementara Trapping berarti mengontrol posisi atom dalam sebuah ruang. Ada dua jenis gaya (force) yang terlibat dalam pengontrolan ini. Efek ekor komet dan pembelokan berkas kumpulan atom merupakan akibat dari adanya gaya radiatif (radiation pressure) yang oleh Ashkin disebut dengan gaya hambur (scattering force) karena dihasilkan bila cahaya mengenai sebuah benda kemudian cahaya tersebut dihamburkan dalam arah yang acak. Gaya radiatif lainnya adalah gaya dipol (dipole force) yang dianggap muncul karena interaksi antara momen dipol induksi pada atom dan gradien medan cahaya yang datang. Gaya dipol ini telah diketahui oleh Askaryan tahun 1962 dan Letokov pada tahun 1968 dan mengusulkannya untuk memerangkap atom. Pada tahun 1978, Ashkin mengusulkan penggunaan kedua gaya tersebut, namun hanya gaya hambur saja pada saat itu yang dimengerti dapat mendinginkan atom. Pemerangkapan atom masih merupakan

sebuah mimpi. Setelah beberapa dekade, penggunaan gaya dipol dalam pemerangkapan menggunakan cahaya laser semakin berkembang salah satunya pengembangan pemerangkap partikel baik atom, bakteri, molekul DNA yang disebut dengan Optical Tweezer yang saat ini telah digunakan dalam penelitian biologi sel dan biofisika.

Sebelum membahas lebih jauh tentang pendinginan dan pemerangkapan atom, penjelasan tentang struktur sebuah atom dan laser diperlukan. Sebuah atom terdiri dari inti atom dan awan elektron yang mengelilingi inti. Untuk energi yang rendah yaitu dalam elektron volt (eV), hanya elektron-elektron dari atom yang berinteraksi dengan keadaan di luar atom (ruang lingkup Fisika Atom) sementara jika energi yang sangat tinggi dikenai pada atom, maka inti atom yang akan berinteraksi dengan keadaan luar (lingkup Fisika Inti). Seperti kita ketahui elektron-elektron dari sebuah atom tersusun ditingkat-tingkat energi seperti yang dinyatakan dalam konfigurasi elektron misalnya Rubidium (85) dengan nomor atom 37 mempunyai 37 elektron yang tersusun dalam konfigurasi elektron dimana hanya 1 elektron terluar pada  $n = 5$  sehingga rubidium termasuk dalam kelompok IA atau golongan alkali dalam daftar periodik. Elektron terluar ini mempunyai tingkat-tingkat energi yang dipengaruhi oleh interaksi elektron tersebut dengan energi luar atau interaksinya dengan inti atom. Misalkan elektron tersebut berada pada tingkat energinya yang paling rendah  $E_0$ , agar elektron bisa pindah ke tingkat energi yang lebih tinggi (tereksitasi) dia akan menyerap energi yang sama dengan perbedaan antara tingkat energi dasar dan tingkat energi eksitasi. Jika energi pengekspitasinya berupa cahaya yang energinya =  $hf$  atau  $h\omega$ ,  $hf$  harus sama dengan  $E_1 - E_0$ . Dengan kata lain frekuensi dari cahaya tersebut harus sama dengan frekuensi resonansi atom tersebut. Bila di lihat lebih jauh lagi yaitu interaksi antara cahaya yang terdiri dari foton-foton dengan sebuah atom yang elektronnya mempunyai tingkat-tingkat energi, misalnya dua tingkat energi  $E_0$  dan  $E_1$ . Ada tiga hal yang dapat terjadi, pertama adalah penyerapan yang distimulasi misalkan dengan menyinari atom dengan cahaya. Setelah elektron berada pada

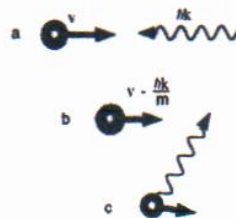
tingkat energi  $E_1$ , dalam waktu kira-kira  $1/100$  juta detik, elektron akan kembali ke  $E_0$  dengan mengeluarkan energi yang diserapnya tadi. Energi yang dikeluarkan ini berupa cahaya dengan panjang gelombang yang sama dengan yang awal. Pengeluaran energi ini disebut emisi. Emisi spontan terjadi begitu saja dan bersifat acak sementara emisi yang distimulasi terjadi beraturan dan akan menimbulkan penguatan seperti yang terjadi pada Laser.

Laser adalah singkatan dari Light amplification by stimulated emission of radiation yang berarti penguatan cahaya dengan menggunakan emisi yang di rangsang atau distimulasi. Cahaya laser memiliki kelebihan dibanding cahaya lampu biasa. Cahaya biasa misalnya dari bola lampu pijar mempunyai warna atau panjang gelombang yang banyak, arahnya menyebar, atom-atomnya tereksitasi secara acak sehingga mempunyai energi yang lemah. Sementara itu pada laser terjadi penguatan cahaya karena emisinya distimulasi sehingga banyak sekali elektron yang berada ditingkat atas dan secara serentak turun ke tingkat bawah. Karena distimulasi, warnanya hanya satu, berkasnya hanya pada satu arah. Perlu diingat karena sifatnya tersebut laser sangat berbahaya. Laser mempunyai kelas-kelas, semakin tinggi kelasnya semakin berbahaya baik bagi mata maupun kulit kita. Sebagai contoh, laser pointer yang digunakan untuk presentasi adalah laser kelas dua yang tidak berbahaya bagi kulit tetapi berbahaya bagi mata karena dapat merusak kornea mata. Dalam eksperimen pendinginan dan pemerangkapan atom, cahaya laser lah yang digunakan bukan cahaya dari sebuah lampu karena sifat-sifat dari laser tersebut.

Bagaimana cahaya bisa memperlambat atom atau mendinginkan atom, sementara yang di ketahui adalah jika benda dikenai

cahaya benda akan menjadi panas sebagai contoh pada proses pemanasan air menggunakan cahaya matahari. Panas terjadi karena benda menyerap energi cahaya yang datang dan diubah menjadi energy panas (heat), sebaliknya, jika atom-atom dari benda tersebut dapat diperlakukan agar dapat mengembalikan energi yang diserap terlebih lagi jika energi yang diberikan kembali lebih besar dari yang datang maka atom akan kehilangan energi. Energi gerak nya akan berkurang, kecepatan nya akan berkurang. Secara kuantitatif peristiwa tersebut dapat dijelaskan seperti pada Gambar 2.1.

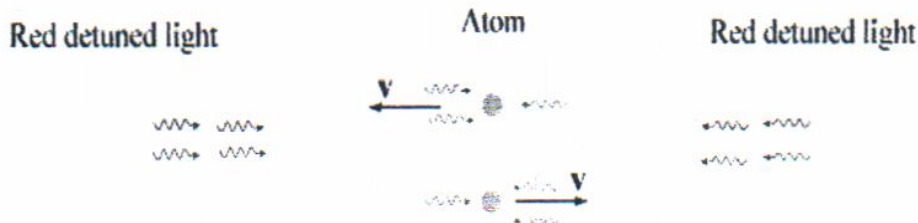
Pada Gambar 2.1, sebuah atom diperlambat bila atom tersebut menyerap sebuah foton. Setelah menyerap foton, atom diperlambat dengan pengurangan kecepatan sebesar  $\hbar k/m$ , dimana  $\hbar$  adalah konstanta Planck,  $k$  adalah bilangan gelombang dari cahaya laser. Cahaya yang diserap akan dipancarkan kembali dalam arah yang random sehingga atom menjadi lebih lambat dari keadaannya semula. Dengan kata lain, dengan menyinari atom dengan cahaya yang tepat, atom atau elektronnya akan tereksitasi dan akan kembali ke tingkat energi semula dengan mengeluarkan energi yang diserap, terjadi perubahan momentum pada proses ini sehingga atom menjadi lambat diibaratkan cahaya tersebut terdiri dari foton foton seperti bola pingpong mengenai atom atau bola bowling. Dengan banyaknya bola pingpong, bola bowlingnya akan diperlambat. Syarat terjadinya adalah frekuensi atau panjang gelombang dari cahaya tersebut harus sama dengan frekuensi resonansi dari elektron tersebut jika tidak atom tidak akan menyerap cahaya tersebut dan tidak terjadi pendinginan atau perlambatan atom. Ini hanya diperoleh dengan menggunakan laser karena laser mempunyai satu panjang gelombang.



Gambar 1. Perlambatan atom jika disinari oleh cahaya laser (a), kecepatan atom berkurang sebesar  $\hbar k/m$  (b), atom akan melepaskan cahaya yang diserap dengan arah yang acak (c).[4]

Saat ini telah ada berbagai teknik pendinginan atom, yang menggunakan prinsip-prinsip fisika. Cara pendinginan atom yang paling sederhana adalah dengan menggunakan efek Doppler seperti diperlihatkan pada Gambar 2.2.. Misalkan ada sebuah cahaya laser dengan frekuensi  $\omega$  menyinari atom yang bergerak ke arah laser dengan kecepatan  $v$ , dari referensi atom, frekuensi laser ini mempunyai nilai yang lebih tinggi (blue shifted). Perbedaan frekuensi laser yang sebenarnya dan yang dilihat oleh atom sebanding dengan kecepatan atom tersebut. Agar frekuensi yang diukur dari referensi atom sama dengan frekuensi laser yang sebenarnya, frekuensi laser

dapat diubah atau direndahkan (Red detuned) agar sesuai dengan yang dilihat atom yaitu sesuai dengan frekuensi yang dibutuhkan oleh elektronnya untuk pindah ke tingkat yang lebih tinggi sehingga energi cahaya bisa diserap. Jika cahaya laser dapat diserap dan dikeluarkan lagi maka akan terjadi pendinginan. Dengan menggunakan dua berkas cahaya laser, setelah atom diperlambat oleh satu berkas laser, atom terdorong ke kanan, oleh berkas cahaya yang dikanan, atom didorong lagi ke kiri sehingga atom di perlambat dari dua arah. Jika dibuat enam berkas, maka atom benar-benar lambat.



Gambar 2. Pendinginan menggunakan efek Doppler dengan menyinari kumpulan atom dengan dua berkas cahaya laser.

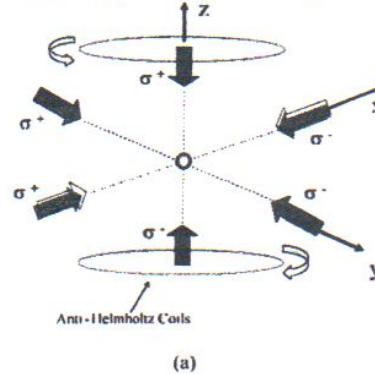
Secara umum, hampir semua atom dapat didinginkan dan diperangkap sepanjang ada interaksi cahaya dan atom. Tetapi secara praktis, ada beberapa kriteria agar Laser Cooling dan Trapping dapat dilaksanakan dengan sukses. Yang pertama, atom-atom tersebut harus mempunyai tingkat-tingkat energi yang dapat diakses oleh cahaya laser dengan panjang gelombang dan daya yang sesuai. Keterbatasan dalam ketersediaan laser dengan daya dan panjang gelombang tertentu di pasaran membatasi jenis atom yang dapat didinginkan. Syarat kedua adalah kemudahan dalam memproduksi berkas atom atau uap atom sehingga tidak memerlukan oven yang rumit dan mahal. Syarat lainnya adalah teknik yang digunakan harus mampu membuat atom menyerap cahaya dan mengemisikannya kembali sebanyak mungkin. Dari syarat-syarat tersebut unsur Golongan I A semuanya telah berhasil didinginkan karena energy transisi

pada golongan ini dapat dengan mudah diakses menggunakan laser komersial yang ada dipasaran. Kemudian unsur ini dapat dengan mudah di buat dalam bentuk gas karena titik didihnya yang rendah.

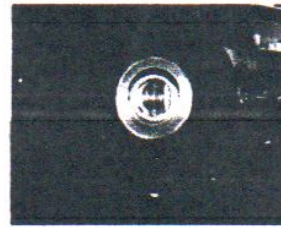
### Magneto-optical trap (MOT)

Pendinginan secara efek Doppler menggunakan dua lintasan cahaya seperti dijelaskan diatas disebut one-dimensional molasses. Sistem ini dapat dikembangkan menjadi tiga dimensi dengan menggunakan 6 lintasan cahaya yang arah cahayanya saling berlawanan yaitu saling menuju satu sama lain. Akan tetapi sistem ini hanya mendinginkan atau memperlambat atom yang bergerak. Setelah atom diperlambat, dilihat dari ruang kordinat atom, atom tersebut tidak lagi berinteraksi dengan cahaya laser karena

atom yang lambat tidak lagi melihat frekuensi cahaya laser sama dengan frekuensi transisinya. Gaya hambat yang bergantung pada kecepatan atom untuk pendinginan diatas dapat dibuat bergantung pada jarak atau posisi atom dengan cara menambah medan magnet yang tidak homogen di ruang vakum dimana atom tersebut didinginkan dan dengan mengubah polarisasi cahaya laser tersebut dari liner ke sirkular atau melingkar. Sistem gabungan ini disebut dengan



(a)



(b)

Gambar 3. Skema MOT dalam tiga dimensi.

Gambar 2.3 menunjukkan 6 lintasan cahaya laser menuju tengah-tengah ruang vakum yang berisi atom-atom, juga diperlihatkan sepasang kawat anti-Helmholtz yang dialiri arus sedemikian rupa sehingga bisa menghasilkan medan magnet tidak homogen dimana ditengah ruang vakum medan magnetnya nol kemudian bertambah dengan bertambahnya jarak kearah luar ruang vakum. Dengan adanya medan magnet, atom yang mencoba keluar dari tengah ruang vakum akan mengalami efek Zeeman dimana tingkat energinya terbelah. Tingkat - tingkat energi transisi ini hanya dapat diakses dengan laser yang berpolarisasi melingkar atau circular polarization  $\sigma^{\pm}$ . dari segala arah atom yang mencoba keluar dari tengah ruang vakum akan didorong kembali ketengah sehingga terperangkap di tengah ruang vakum tersebut.

#### Aplikasi dari Atom Dingin

Salah satu aplikasi dari atom dingin adalah pembuatan Bose-Einstein Condensate (BEC). Seperti yang telah diketahui ada dua jenis distribusi partikel yang sering dibahas dalam ilmu fisika statistik yaitu partikel-partikel yang mempunyai identitas yang sama. Yang pertama adalah Bose-Einstein Statistics atau distribusi Bose-Einstein (BE) yang merupakan

magneto-optical trap (MOT) yang dipaktekkan pertama kali oleh Steven Chu atas saran Dalibard [7]. MOT telah menjadi sebuah prosedur standar untuk memproduksi atom - atom dingin sebelum digunakan untuk aplikasi lebih lanjut. Pada Gambar 2.3 diperlihatkan skema MOT dalam tiga dimensi dan gambar atom -atom dingin yang terperangkap ditengah sebuah ruang hampa (vaccum chamber).

generalisasi dari distribusi Planck terhadap partikel-partikel foton. Distribusi kedua adalah Fermi-Dirac Statistics untuk partikel-partikel fermions seperti elektron. Fermi Dirac distribusi dikembangkan setelah berkembangnya ilmu Fisika Kuantum dan pengecualian Pauli (Pauli exclusion principle). Sementara itu distribusi Bose-Einstein berlaku untuk partikel-partikel boson yaitu partikel yang mempunyai spin bilangan bulat ( nilai spinnya bukan dalam pecahan). Distribusi BE dinyatakan dalam rumus

$$N(E) = 1/[e^{\square(E-\square)} - 1] \quad \dots(1),$$

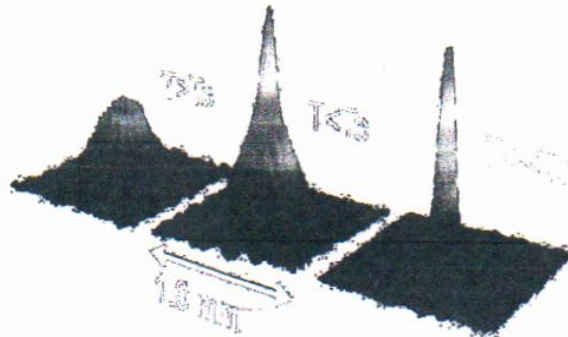
Dimana  $\square = 1/(k_B T)$  dan  $\square =$  potensial kimia yang menjadi nol untuk foton sehingga persamaan (1) menjadi distribusi Planck. Einstein telah mengamati bahwa distribusi ini mempunyai sifat yang sangat unik yaitu pada suatu keadaan dimana energi rata-rata partikel-partikel tersebut sangat rendah yang terjadi pada suhu yang sangat rendah. Pada suhu yang rendah, energi total dari kumpulan partikel atom dapat menjadi rendah jika banyak dari atom-atom tersebut berada pada tingkat energi dasarnya dan hanya sedikit yang berada di tingkat energi eksitasinya.

Kondisi untuk BEC pada gas dapat dinyatakan dalam panjang gelombang de Broglie  $\lambda_{dB}$  sebagai [ 13 ]:

$$n\lambda_{dB} \geq 2,612 \dots\dots\dots (2),$$

dimana  $n$  adalah densitas spasial dari atom-atom tersebut. Ini berarti atom-atom tersebut mempunyai panjang gelombang yang sama. Ekperimen pertama yang mencoba untuk merealisasikan BEC adalah ekperimen menggunakan  $^4\text{He}$  cair pada tahun 30an. Pada temperature 2.2 K, kondisi persamaan (2) terpenuhi tetapi karena suhunya masih tinggi, interaksi antara atom-atomnya sangat kuat, sehingga hanya sekitar 9 % dari atom-atom itu yang menjadi BEC bahkan sifat-sifat dari sistemnya begitu kompleks sehingga tidak memenuhi hukum distribusi Bose-Einstein. Banyak sekali penelitian lanjutan dilakukan, barulah pada tahun 1998 BEC dengan menggunakan atom H berhasil walau tidak menggunakan teknik pendinginan menggunakan

laser. Syarat yang mendasar untuk mencapai BEC adalah temperatur yang rendah dan densitas atom yang tinggi. Dengan ditemukannya teknik pendinginan menggunakan laser dan medan magnet, densitas atom yan tinggi dapat dicapai. Dengan menggunakan MOT, densitas  $n$  bisa mencapai  $10^{10}$  atom/cm<sup>3</sup>. Untuk memenuhi persamaan (4) diatas dengan nilai densitas ini, temperatur sistem harus dalam batas nK ( $10^{-9}$  K) yang tidak dapat dicapai dengan teknik pendinginan secara laser, jadi atom yang sudah didinginkan menggunakan MOT harus didinginkan lagi secara penguapan menggunakan medan magnet atau menggunakan jenis pemerangkapan lainnya yang disebut dengan far of resonance trap. Pada gambar 3. 1 diperlihatkan gambar dari kumpulan atom yang membentuk BEC pada suhu yang berbeda-beda. Disini  $T_c$  adalah suhu kritis.



Gambar 4. Gambar yang merepresentasikan kumpulan aton-aton dingin BEC [13].

Aplikasi lainnya dari atom dingin adalah pembuatan interferometer atom. Secara umum, interferometer adalah suatu alat ekperimen Fisika yang digunakan untuk pendeteksian perbedaan fase antara dua lintasan cahaya. Perbedaan fase ini mengandung informasi tentang kondisi atau lingkungan yang dilalui. Berdasarkan geometrinya, ada beberapa jenis interferometer diantaranya adalah Sagnac interferometer, Michelson Interferometer dan Mach-Zehnder Interferometer. Sebelum pengembangan teknik pendinginan atom secara laser, interferometer dibuat menggunakan cahaya

laser yang merupakan partikel-partikel foton. Setelah diperolehnya atom dingin, interferometer menggunakan atom makin diminati dengan alasan interferometer atom lebih akurat karena atom berinteraksi lebih kuat dengan lingkungannya dan perbedaan kuantum fasenya sangat bergantung pada efek seperti gaya-gaya inersia dan medan elektromagnetik sehingga merupakan alat yang sangat sensitif terhadap suatu perubahan yang kecil. Masalah yang timbul adalah kesulitan dalam memisahkan kumpulan-kumpulan atom menjadi dua

atom berinteraksi lebih kuat dengan lingkungannya dan perbedaan kuantum fasenya sangat bergantung pada efek seperti gaya-gaya inersia dan medan elektromagnetik sehingga merupakan alat yang sangat sensitif terhadap suatu perubahan yang kecil. Masalah yang timbul adalah kesulitan dalam memisahkan kumpulan-kumpulan atom menjadi dua kumpulan atom yang berbeda jaraknya agar terbentuk suatu interferometer. Dengan ditemukannya BEC, pekerjaan ini lebih mudah, karena BEC berada pada kecepatan yang sangat rendah dan dapat dipisahkan lebih mudah. Pada BEC, fase kuantumnya adalah homogen persis seperti atom dalam medan magnet yang mempunyai orientasi yang homogen. Atom interferometer dengan BEC dimasa depan dapat menjadi suatu alat yang sensitif untuk navigasi dan eksplorasi minyak. Dengan telah berkembangnya teknik untuk membuat pemerangkap atom miniatur "atom chip" memungkinkan untuk membuat sensor mini yang presisi.

Salah satu motivasi berkembangnya bidang penelitian laser cooling dan trapping adalah perbaikan dalam keakuratan jam atom. Jam atom pertama dibuat untuk membuat sebuah standar waktu dunia. Jam atom tersebut dibuat dari atom Cesium yang merupakan Golongan IA dimana elektron terluarnya satu. Dengan menggunakan dua tingkat energi pada elektron tersebut, dapat dibuat sebuah kondisi seperti bandul atau ayunan dimana elektronnya beresonansi diantara kedua tingkat energi tersebut, perioda ayunan tersebut yang dikalibrasi menjadi standar untuk satu detik. Atom digunakan sebagai media ayunan ketimbang bandul pada jam dinding atau Quartz pada jam tangan karena atom beresonansi pada frekuensi yang sama setiap saat. Jam atom pertama mempunyai ketidakpastian sekitar  $10^{-4}$  detik per hari yang berarti berubah 1/10000 detik perhari. Sementara Jam atom komersial yang digunakan untuk penerbangan, GPS dan penelitian dimana atom cesium berada pada suhu kamar mempunyai ketelitian  $10^{-8}$  detik per hari. Jam atom yang didinginkan dilaboratorium yang disebut Fountain atomic clock mempunyai keakuratan  $10^{-10}$  detik per hari [14]. Salah satu penggunaan jam atom yang akurat adalah penggunaannya dalam global positioning sistem yang disingkat GPS yang dulunya di gunakan oleh angkatan militer amerika sekarang sudah dapat digunakan secara

komersial. Dalam pengoperasiannya GPS menggunakan jam atom, jam atom juga tersedia secara komersial, sementara yang masih dikembangkan masih dalam skala labor, jika jam atom dingin dalam bentuk chip dapat dikombinasikan dengan GPS maka penentuan lokasi di bumi mempunyai keakuratan dalam meter bukan lagi dalam kilometer.

Penelitian dalam aplikasi atom dingin dan pengembangan teknik mendinginkan atom terus berkembang dan masih banyak hal-hal yang belum diketahui dan membutuhkan penelitian lebih lanjut.

### Daftar Pustaka

- P.A.Tipler dan R.A. Llewellyn, *Modern Physics*, (W. H. Freeman & Company, New York, 1999).
- C.Savage, Introduction to Light Forces, Atom Cooling and Atom Trapping, *Aut. J.Phys.* 1996, 49,745-64.
- A. Ashkin, (1970), "Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure", *Phys. Rev. Lett.* 24,56.
- W. D. Phillips, (1998), Laser Cooling and Trapping of Neutral Atoms, *Reviews of Modern Physics*, 70, 721
- T.W. Hansch and A. L. Schawlow, (1975), "Cooling of Gases by Laser Radiation", *Opt. Comm.* 13, 68.
- D. J. Wineland and H. Dehmelt, (1975), "Proposed  $10^{14}$  Laser Fluorescence Spectroscopy on  $Tl^+$  Mono-Ion Oscillator", *Bul. Am. Phys. Soc.* 20, 63.
- S. Chu, L. Hollberg, J. Bjorkholm, A. Cable, and Ashkin, (1985), "Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonant radiation pressure", *Phys. Rev. Lett.* 55, 48
- R. Grimm \Research groups working with atoms traps," retrieved on May 2006 from <http://www.uibk.ac.at/exphys/ultra-cold/atomstraps.html>



- D.W. Keith, C. R. Ekstrom, Q. A. Turchette, and D. E. Pritchard, (1991), "An interferometer for Atoms", Phys. Rev.Lett. 66, 2693
- E. A. Hinds and I. G. Hughes, (1999), "Optical Lattices", J. Phys. D 32, R119.
- P. S. Jessen and I. H. Deutsch, (2004), "Quantum Information Processing with trapped Neutral Atoms", Quantum Information Processing, 3,15.
- K. B. Davis *et al.*, (1995), "Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms", Phys. Rev. Lett. 75, 3969
- M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, (1995), "Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor", Science 269, 198.
- <http://www.aero.org/publications/crosslink/winter2000/02.html>