



بارد جدا بالفعل: فيزياء النانو كلفن لتكثيف بوز اينشتين

Very Cold Indeed: The Nanokelvin Physics of Bose-Einstein Condensation

Eric Cornell

كلما اصبحت الذرات باردة، فانها تبدأ بالتصرف مثل الامواج اكثر من الجسيمات. تبريد سحابة من الذرات المتماثلة بحيث تصبح موجة كل ذرة تتداخل مع موجة الذرة المجاورة لها، وفجأة في النهاية تصبح لها حالة حرجة كوانتية تعرف باسم تكثيف بوز اينشتين Bose-Einstein condensation. كيف نحصل على شيء بهذه الدرجة من البرودة؟ وما هي طبيعة المادة اللزجة الغريبة الناتجة؟ هذه الاسئلة وجهت في ندوة في المعهد الدولي للقياسات والتكنولوجيا في Gaithersburg في Maryland في 23 فبراير من العام 1996. هذه الورقة العلمية عرضت في تلك الندوة

كلمات مفتاحية: الليزر الذري، مصيدة الذرة، تكثيف بوز اينشتين، التبخر بالتبريد، الموائع الفائقة، الغازات الفائقة.



جمهور اليوم اكثر من ان نسمى هذه بحدث عائلي، على ما اظن، ولكن بالتأكيد هذه متعة بالنسبة لي لاعطي هذه المحاضرة لمستمعي NIST. المحاضرة التي سوف اخبركم عنها اليوم تم تجهيزها في JILA، بالتعاون مع NIST وجامعة كلورادو مع مشاركة فعالة من كارل ويمان، بروفييسور جامعة كلورادو الذي عملت معه 5 اعوام حتى الان.

وكما من المحتمل انكم خمنتوا كارل وانا لم نقم بالعمل الفعلي. كثير من العمل قام به مجموعة من المتخصصين في JILA، الذي نراهم في الشكل 1. وقد حظينا في JILA ببعض المساعدة من والدعم كما حظينا بزوار متخصصين خلال هذه الاعوام، هذا بالاضافة الى مصادر دعم مادي من داخل المؤسسة ومن خارجها.

دعوني اصف لكم ما هو تكثيف بوز اينشتين Bose-Einstein condensation وبالاخص لماذا صعب ان نصل له، ساخبركم كيف تمكنا من ان نفعلها، ومن ثم ساوضح لكم ماذا نريد ان نفعله بهذه التكتيفات. هذه ايضا طريقة لشرح لماذا نرغب في عملهم من البداية.

كل شيء في العالم، بالاخص كل الجسيمات وحتى مركبات الجسيما والسيارات وكل شيء اخر يمكن ان يقسم الى فئتين كبيرتين تسمى بوزونات وفرميونات.

البوزونات هي جسيمات لها عزل spin يساوي عدد صحيح، والعزم الزاوي angular momentum للجسيمات هو 0, 1, 2, 3 وهكذا، بوحدة ثابت بلانك المخفض $\hbar = h/(2\pi)$. الفرميونات هي جسيمات تمتلك عزم يساوي انصاف اعداد صحيحة 1/2, 3/2, 5/2 وهكذا بنفس الوحدة.

هناك بعض الامثلة الكلاسيكية. كلا من الفتوتونات والفونونات امثلة على البوزونات. نسبة كبيرة من الذرات التي نراها حولنا هي بوزونات، ذرات (87Rb) rubidium-87، على سبيل المثال، هذا فقط رسالة سريعة لنعرف الى اين نحن ذاهبون.

الفرميونات هي أي شيء حتى الاكثر شيوعا. معظم الاشياء الاساسية التي تعتبر وحدات بناء العناصر هي فيرميونات: الالكترونات والنيوترونات والبروتونات والنيوترونات والذرات البسيطة، بما فيها الهيليوم الثلاثي (3He) هي ايضا فيرميونات.

بالطبع، كل الذرات مصنوعة من مجموعة من الفيرميونات مرتبطة مع بعضها. لكن اذا ربطت مع بعض عدد زوجي من الفيرميونات، ستحصل على جسيم مركب بغزل له عدد صحيح وهذا يعتبر بوزون.



الشكل 1. فريق جامعة كلورادو و JILA الذين لاحظوا لأول مرة تكثيف بوز اينشتين في الغاز. من اليسار الى اليمين: Carl Wieman و Michael Matthews و Michael Anderson و Jason Ensher و Eric Cornell. اكتشافهم هذا تم نشره في موضوع بعنوان ملاحظة تكثيف بوز اينشتين في بخار ذري مخفف (Condensation in a Dilute Atomic Vapor Observation of Bose-Einstein) بواسطة M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell في مجلة Science 269, 198



لماذا نحن نهتم بها؟ حسناً، لأسباب غامضة، غزل الجسيمات له الكثير ليفعله، إذا اردنا ان ننظر لشخصية هذه الجسيمات على انها اشياء تتصرف كالانسان.

البوزونات تحب ان تكون في نفس الحالة. البوزونات اجتماعية. أي انهم يحبوا ان يكونوا في مجموعات. الفيرميونات على الجانب الاخر احادية. لكي نكون عمليين اكثر هذا السلوك الغير اجتماعي للفيرميونات هو السبب في وجود مبدأ باولي للاستبعاد.

لهذا السبب يوجد الكترون واحد في كل مدار حول الذرة، لا يمكنك ان نحصل على اكثر من فيرميون يفعل نفس الشيء.

البوزونات، على الجانب الاخر، تحب ان تفعل نفس الشيء. على سبيل المثال في مؤشر الليزر هذا الذي امسكه بيدي، هناك عدد هائل من الفوتونات التي في البداية ترتد ذهابا وايابا داخل المؤشر ومن ثم يخرجوا من احدى النهايتين. كلهم يكونوا في نفس الاتجاه بنفس الطاقة.

هم في الحقيقة في صورة تكثيف عندما يخرجوا من هنا (قصده المؤشر) وهذا عرض ملتيميديا يوضح الطبيعة الاجتماعية للبوزونات.

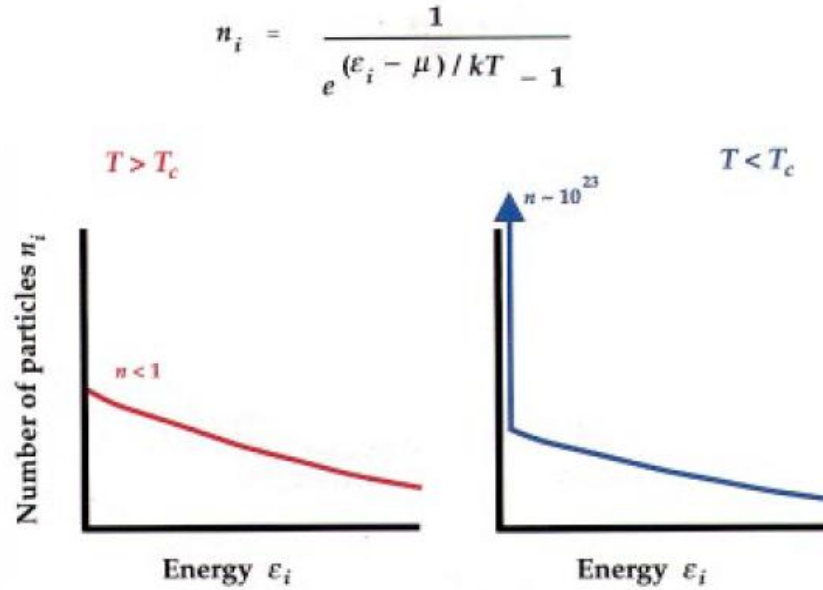
انه العالم بوز هو الذي اقترح السلوك الاجتماعي في الفوتونات يمكن في الحقيقة ان يحسب لشي يحدث عندما يصبح الغاز ساخنا جدا، والذي هو اشعاع الجسم الاسود.

العالم اينشتين اهتم كثير بهذا وفي العام 1925 وضح انه بالامكان ان يطبق بعض تلك القواعد على جسيمات بوزونية اخرى وحصل على مبدأ عرف باسم توزيع بوز اينشتين.

ربما تعتقد كيف هو حصل على توزيع بوز اينشتين من خلال ممارسة لعبة الميكانيكا الاحصائية. ابدأ بصندوق. الصندوق يحتوي على جسيمات وحصرها يعمل على رفع مجموعة من الحالات الكوانتية، والتي تسمح فقط باماكن تستطيع ان تضع فيها الجسيمات.

خذ عدد ثابت من الذرات تتشارك فيما بينها بنفس مقدار الطاقة. قاعدة الميكانيكا الاحصائية تسمح لك بان تضع أي عدد من البوزونات الغير متميزة (أي المتماثلة) في حالة محددة.

الآن ابدأ اللعبة، وهي توزيع الجسيمات على هذه الحالات بطريقة عشوائية تماما بينما لا تزال تتبع قاعدة الميكانيكا الاحصائية. اعظم توزيع احصائي يعرف باسم توزيع بوز اينشتين. صورة عنها موضحة في الشكل 2.



الشكل 2. مخطط يوضح توزيع بوز اينشتين لنظام من الجسيمات عند درجة حرارة T . الصيغة الرياضية توضح متوسط عدد الجسيمات n_i الذي يشغل الحالة i من الطاقة ϵ_i . المعامل μ هو الجهد الكيميائي، والذي يشير الى الطاقة اللازمة لاضافة جسيم اضافي للنظام. الاطار على الجانب الايسر يتنبأ بالسلوك العام لهذا التوزيع فوق درجة حرارة الانتقال T_c ، واللوحة على اليمين توضح الاشغال الميكروسكوبي لحالة الطاقة الدنيا للنظام عندما $T < T_c$.

هذا هو متوسط عدد الجسيمات في المستوى i . طاقة المستوى هي ϵ_i . الـ μ و T ، اذا فكرت بالامر بشكل رياضي فانك تعتبرهم مضاعفات لاجرانج، ولكن بشكل اكثر قبولاً فهم يعتبروا جهود كيميائية ودرجة حرارة. اساساً انت سوف تلتقط هذا بالترتيب للحصول على الطاقة والعدد الصحيح. هذا يبين لك كيف تنشر توزيع الجسيمات حولك.



هذه الدالة تبدو لك قريبة الشبه مع توزيع ماكسويل بولتزمان، اذا اهملت -1 في المقام. ولكن لا يمكنك اهمال
-1: فهذا ما يعطيك كل الاحداث في هذا التوزيع.

وبالتالي في هذه اللعبة انت تكوم الجسيمات في صندوق. ومعظم الجسيمات تذهب للأسفل في حالة مستويات
الطاقة الدنيا، ومن ثم هناك ذيل للتوزيع عند الطاقة العالية.

ولكن عندما تصبح باردة بما فيه الكفاية، فان شيء ملحوظ سوف يحدث فجأة. وتحصل على عدد هائل من
الجسيمات كلها تجلس في ادنى مسوى طاقة متوفر في الصندوق الذي فيه الذرات. هذا يسبب ظهور شرارة
في توزيع الطاقة عند الاصل: هذا هو تكوين تكثيف بوز.

سوف لا اقوم باشتقاق تعبير للشروط التي يحدث عندها الانتقال. انها تصف نقطة في فراغ الطور phase
space، حيث ان حاصل ضرب البرودة والكثافة للغاز الذري يصبح مرتفع جدا، انظر الشكل 3.

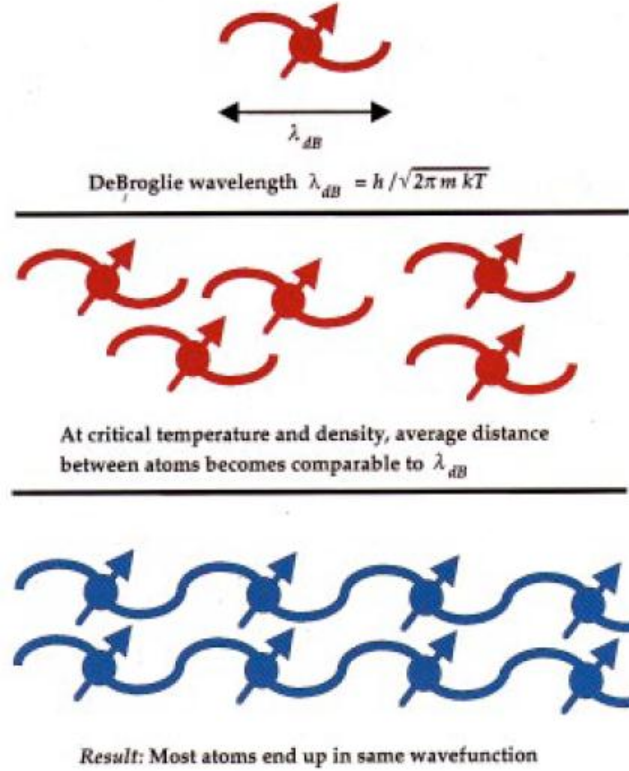
نحن نعلم ان الفوتونات لها طول موجي. وقد تبين ايضا ان الذرات تمتلك طول موجي، ويعتمد الطول
الموجي للذرات على كمية حركتها. الفكرة الاساسية ان الجسيمات تشبه الامواج. والامواج تشبه الجسيمات.

كما اصبحت الذرات اكثر برودة فان اطوالها الموجية، والتي تعرف باسم طول موجة دبرولي، تصبح اطول
واطول: الشيء الغامض ان الجسيمات تصبح اكثر وضوحا.

في غاز يحتوي على ذرات بوزون متماثلة، عندما الجسيمات تصبح قريبة جدا من بعضها البعض، او
يصبحوا في درجة حرارة منخفضة جدا فان طول موجة دبرولي لذرة واحدة تتداخل مع الاخرى ويحدث
للذرات كارثة تطابق كوانتية. وعند هذه النقطة تظهر حالة تكاثف بوز اينشتين.. هذا يحدث عند كثافة فراغ
طور يساوي تقريبا 1، بوحدة ثابت بلانك h .

في طريق الوصول الى التكاثر، اذا نظرت إلى عدد الجسيمات في حالة الطاقة الدنيا، والتي هي العقد في
الدالة الموجية عند اسفل قاع الصندوق سوف تجد ان هناك ذرة واحدة او بضع ذرات في هذه الحالة.

وعندما يبرد الغاز حتى يصل إلى نقطة التحول، يتراكم عدد الذرات فجأة عند القاع ويصل حتى سقف
الصندوق.



الشكل 3. حدوث تكثيف بوز اينشتين عندما تصبح اطول موجات ديبرولي للذرات في الغاز تقارن بمتوسط المسافة بين ذرات الغاز

اذا كان عدد الجسيمات في النظام مقارب لعدد افوجادروا $NA=6 \times 10^{23}$ ذرة، والذي يشير الى خاصية من خواص الاجسام الجاهرية (الماكروسكوبيك)، وحتى اذا كنت باقل من درجة الحرارة الحرجة بنسبة قليلة سيكون لديك جزء لا بأس به من عدد افوجادروا من الجسيمات كلها تقوم بنفس الشيء.

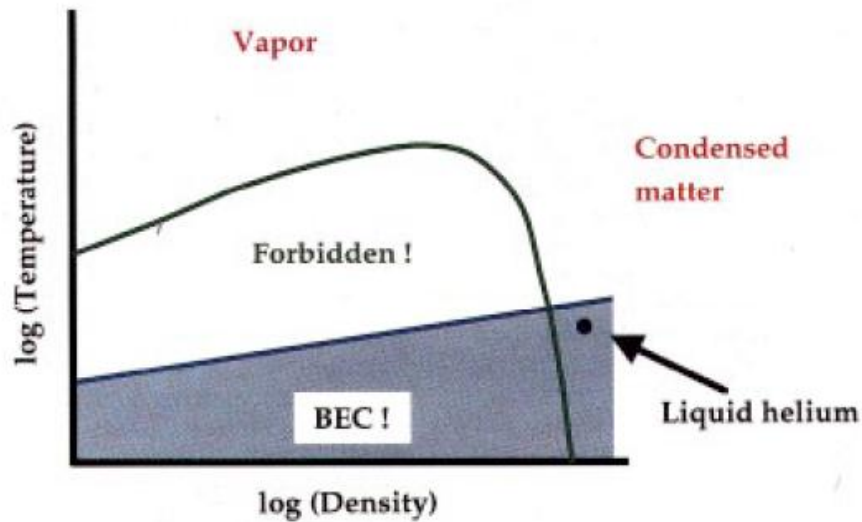
فكرة خاطئة منتشرة حول تكثيف بوز اينشتين وهي انها تتطلب تبريد بقوة كبيرة. متوسط طاقة الجسيمات تعطى بحاصل ضرب KT أي ثابت بولتزمان ودرجة الحرارة المطلقة. ولذلك اذا اردت ان تصل إلى درجة منخفضة جدا فانه ليس من الغريب ان كل الجسيمات كانت في ادنى حالة طاقة، لانها لا تمتلك طاقة كافية للذهاب إلى أي مكان اخر. ولكن التكثيف يمكن ان يحدث عند درجات حرارة اعلى، عندما kT لا زالت كبيرة بالمقارنة مع فرق الطاقات بين المستويات المكتمة في النظام. وهذه ملاحظة للخبراء.

المثال الكلاسيكي لتكاثف بوز اينشتين لسنوات عديدة كان الهيليوم المسال. عند درجة التحول للهيليوم المسال من السائل العادي الى السائل الفائق، تنعدم اللزوجة ويبدأ الهيليوم بالتصرف كسائل كوانتمي. كثافة فراغ الطور عند نقطة التحول هي بالضبط عند العدد الذي نتوقعه ان يكون اذا كان الهيليوم في الحقيقة تكاثف بوز اينشتين.

يعتقد معظم الناس ان هذا الهيليوم هو تكاثف بوز اينشتين. ولكن هو سائل وليس غاز، وذرات الهيليوم في السائل تتفاعل بقوة. النظام صعب ان يفهم على مستوى بدائي. ولهذا بذل جهد كبير لعدة سنوات في محاولة الحصول على تكاثف بوز اينشتين في شيء قريب من الغاز.

لماذا تطلب الامر كل هذه المدة؟ لماذا حالة تكاثف بوز اينشتين صعبة؟ هنا صورة وصفية عامة للمشكلة، صورت في فراغ الطور (الشكل 4). وببساطة هذا ينطبق على كل المواد.

المحور الرأسي يحدد درجة حرارة النظام، والمحور الاقوي كثافة النظام. الخط الاخضر هو حدود الطور. الموقع المضبوط للخط الاخضر يمكن ان يتحرك قليلا، ولكنه موجود لكل المواد. عند كثافات منخفضة ودرجات حرارة عالية، كل شيء يكون بخار. عند كثافات عالية ودرجات حرارة منخفضة



الشكل 4. مخطط عالمي للطور أي مادة عادية.



كل شي يتكثف، اما في حالة سائلة او حالة صلبة.

اسفل الخط الاخضر هناك مساحة كبيرة لا يمكن ان تصل إلى حالة الاتزان الحراري. تعرف بالمنطقة الممنوعة.

على سبيل المثال، اذا اردت ان تأخذ صندوق وتحافظ على بقائه عند درجة حرارة معينة وتضع به ذرات كفاية لاشتقاق متوسط الكثافة في المنطقة الممنوعة، فانك لا تزال لا تجد أي شيء بهذه الكثافة ودرجة الحرارة. لانها سوف تنفصل.

عند قاع الصندوق، سوف يكون هناك شيء كثافته عالية، مثل الماء او الثلج، وفي اعلى الصندوق سوف يوجد بخار، ولا يوجد شيء في المنطقة الممنوعة.

لماذا هذا مهم؟ انه مهم لان الانتقال الى طور تكاثف بوز اينشتين، والذي هو موضح بالخط الازرق في هذا الشكل، دائما يكون في الاسفل العميق في المنطقة الممنوعة. المواقع النسبية للخط الاخضر والخط الازرق لاي مادة هي كما هو متوقع في الشكل، ما عدا للهيليوم المسال. لذلك الهيليوم المسال هو المادة الوحيدة التي يمكن ان تعتبر تكاثف بوز اينشتين تحت ظروف الاتزان الحراري العادي. كل شيء اخر يتصلب في مدى الكثافة ودرجة الحرارة.

ترى الان الصور التي نتجت من ميكروسكوبات النفق الكمي Scanning tunneling microscopes حيث ان كل ذرة بمفردها يمكن ان نراها. حسنا، اذا كنا نستطيع ان نرى الذرة، فهي الان لم تعد غير مميزة، لذلك فان قواعد تكاثف بوز اينشتين لا تعمل. لا يمكن ان تحصل على شكل صلب لتكاثف بوز اينشتين.

اسفل الخط الازرق هو حيث نريد ان نذهب. يمكننا ان نرى ان هذا الخط يقع في المنطقة الممنوعة. هل من المستحيل ان نذهب الى هذه المنطقة الممنوعة؟ لربما انها نكتة قديمة لـ Joseph Heller، اذا كانت بالفعل مستحيل، فانه لا يهتم بان يمنعها. هذا مشجع!

كيف نصل الى المنطقة الممنوعة؟ عن طريق استخدام ظاهرة معروفة تعرف باسم شبه استقرار metastability.

لنفترض ان لديك غاز في صندوق في حالة اتزان حراري وهو بارد ولنفترض انه عند درجة حرارة 200 K. البخار سوف يكون اما بارد كفاية او كثافة بمقدار كافي للوصول إلى حالة تكاثف بوز اينشتين. الطريقة



التي نتبعها ليتكثف هي ان نبدأ ببخار سميك عند درجة حرارة عالية ومن ثم تبريده ببطء شديد. اذا تم برد بسرعة سوف نحصل في النهاية على بخار سميك عند درجة حرارة منخفضة بدون ان يحدث طور التكاثف ابدا.

السبب في ذلك هو ان الثلج او البلورات او القطرات تحتاج الى شيء للتمركز حوله. ومن المحتمل ان تكون على علم بذلك. اذا كان لديك غاز يمكنك ان تبرد الغاز الى درجة حرارة تحوله الى سائل لان لا يوجد اماكن للقطرات بان تتكون.

عندما تتكون القطرات، فانها تتكون على الجدران او على الغبار او على الشوائب الموجودة في النظام. اذا كان النظام نظيف جدا بدون غبار، واذا وجد شيء يمنع الذرات من ان تلمس الجدران، فانه بإمكانك ان تصل الى المنطقة الممنوعة بدون تكون حالة التكاثف. وتدخل المنطقة الممنوعة في حالة شبه مستقرة، لانها تبقى مستقرة اذا لم توجد مراكز للتمركز.

كل جهود تكاثف بوز اينشتين حتى اليوم حاولت الوصول إلى تلك الحالة شبه المستقرة قبل ان تبدأ الذرات بالتشكل في شكل ثلج سميك او بخار رقيق. الفكرة هنا هو ان تبقى عند كثافات منخفضة جدا، لذلك تصادمات الاجسام الذرية الثلاثية غير محتملة ان تحدث. حتى اذا لم تلمس الذرات الجدران، حيث ان تصادمات الجسيمات الثلاثية يسبب في تكون جزيئات بشكل تلقائي، وهذه الجزيئات يمكن ان تشكل تلقائيا قطرات او تجمعات. ذرتين فقط لا يمكنها ان تشكل جزيء لانها يتصادمان ويرتدان بعيدا، ولا يوجد شيء يجعلهما يلتصقان مع بعض. لكن اذا تصادمت ثلاثة ذرات مع بعض في نفس الوقت، فان ذرتين يمكن ان يتصادما ويلتصقا مع بعض كجزيء، والذرة الثالثة تذهب بعيدا بالطاقة الاضافية. بمجرد ان نحصل على الجزيئات فانها بسرعة تتراكم في شكل ثلج.

لذلك كلما تمكنت ان تحافظ على حالة الكثافة المنخفضة جدا فان الذرات لا تستطيع ان تبدأ الخطوة الاولى وتكون جزيء، وسوف تكون الامور على ما يرام.

دعنا نلقى نظرة على الجهود التي بذلت لرؤية تكاثف بوز اينشتين. بعض الناس الذين كانوا رواد في تقديم افكار عديدة في هذا المجال هؤلاء الذين عملوا مع ذرات الهيدروجين المغزلي المستقطب: على سبيل المثال، Walraven في امستردام، و Silvera في هارفارد، و Kleppner و Freytak في MIT- ومجموعة Cornell. هؤلاء اخذوا جزيئات الهيدروجين وقاموا بتحليلها إلى ذرات، ووضعوا الغاز في ثلاجة عند درجة



حرارة معينة. ومن ثم ضغطوه شيئاً فشيئاً مع بعض. ولكن قبل ان يتمكنوا من الحصول على خط الانتقال، اصبحت الذرات كثيفة جداً وبدأت في تكوين الجزيئات من خلال الية تصادمات الاجسام الثلاثية، والتي وصفناها قبل قليل.

مصاديد اخرى تأخذ الهيدروجين الذري، بدلا من ان ضغطهم، يعملون على تبريده باستخدام تقنية تعرف باسم التبريد بالتبخير. كما انها تقترب من تكاثف بوز اينشتين. هذا مشجع لنا لينجرب باستخدام تقنية مشابهة. لاحظنا انه يجب ان نتوجه إلى درجة كثافة منخفضة جدا بحيث لا نحصل على اعادة الترابط ثلاثي الاجسام. اذا حصلت على كثافات منخفضة، عليك ان تتوجه ايضا إلى درجات حرارة منخفضة. ولهذا صدمنا بدرحة الحرارة المنخفضة بشكل غير عادي للحصول على تكاثف بوز اينشتين.

تجربة غير معروفة كثيرا ولكن على ما اعتقد انها جميلة لانها تبذل شغل على الاكسيتونات، والتي هي ازواج مترابطة من الالكترونات والفجوات في بعض انواع الزجاجيات. غاز الاكسيتون يمكن ان يبرد للحصول على تكاثف بوز اينشتين. هذا هو عمل Jim Wolfe في جامعة اليزونا.

فقط لازودكم بفكرة عن حجم العمل وكذلك خط العمل، لقد كنا قادرين ان نقوم بذلك حديثا في الريبيديم عند كثافة منخفضة جدا: اقل بعشرة مرات من كثافة الهيليوم المسال. ليس مدهشا، فقد اقتربنا من برودة اقل بعشرة مرات من الهيليوم المسال للحصول على تكاثف بوز اينشتين. كيف لنا ان نحصل على شيء بهذه الدرجة من البرودة؟ في البداية استخدمنا التبريد بالليزر لذرات فلووية. هذه التقنية كان رائدة هنا في NIST، ولكن ايضا في مختبرات بل، وفي Ecole Normale في باريس وفي JILA وفي MIT.

الان لنلقي نظرة حول التبريد بالليزر. انها غنية بشكل غير اعتيادي بحيث تستحق ان يخصص لها ندوة مستقلة بذاتها، ولكن ما سوف اخبركم به هو شيء مختصر.

اشعة الليزر، بالاضافة الى انها تحمل حرارة معها الا انها تحمل ايضا عزم momentum. اذا خرجت خارج القاعة وتعرضت إلى اشعة الشمس، فان الضوء الذي يصطدم بك على جانب من جسمك سوف يطبق ضغط صغير. هذه القوة التي يحملها الضوء صغيرة جدا. ولكن على الجانب الاخر، كتلة الذرات ايضا صغيرة جدا، بحيث ان قوة الضوء المؤثرة على الذرة تتحول الى شيء كبير، العجلة التي تكتسبها الذرة بسبب قوة الضوء قد تصل إلى 10000 مرة قوة الجاذبية الارضية. هذه قوة كبيرة بالفعل من وجهة نظر الذرة. ولكن تحتاج إلى اكثر من القوة. نحتاج الى ان نطبق هذه القوى على الذرة لنعمل على تقليل سرعتها، أي



تبريدها. الطريقة التي يعمل بها التبريد بالليزر هو ان نسلط اشعة الليزر من اتجاهين لنقول واحد من اليسار وشعاع اخر من اليمين. الان افترض انني ذرة تتحرك الى اليمين. لكي اقلل سرعتي علي ان امتص فوتون قادم باتجاهي من ناحية اليسار، وليس الفوتون القادم من الخلف باتجاهي. هذا يمكن ان يرتب باستخدام انزياح دبلر.

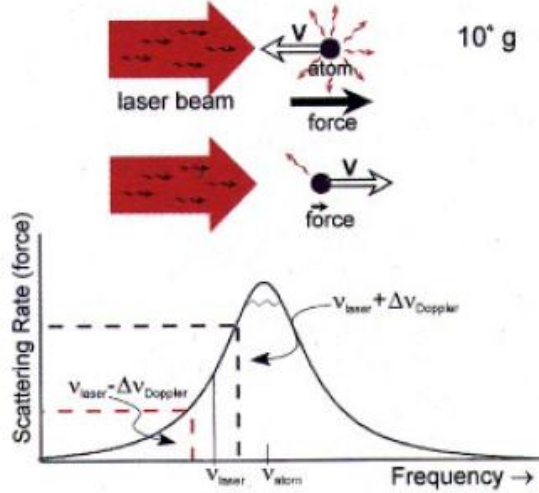
هنا نرى كيف تعمل (انظر الشكل 5). هذا هو منحنى الرنين يوضح استجابة الذرة للتردد، أي كيف يمكن للذرة ان تنتشبت الفوتونات كدالة في تردد الليزر.

نقوم بضبط تردد الليزر على تردد قليل وليكن اللون الاحمر من جانب منحنى الرنين. اشعة الليزر التي تعاكس الذرة في انزياح دبلر يكون باتجاه التردد الاعلى أي الازرق. ولهذا فان الذرة تكون اقرب لامتصاص الفوتون. الفوتون القادم من خلف الذرة يكون اكثر احمرارا، مما يعني ان الذرة اقل استجابة لامتصاص ذلك الفوتون. ولذلك في أي اتجاه تتحرك فيه الذرة، فان اشعة الليزر التي تعاكس حركتها تكون اقوى على الذرة وتعمل على تقليل سرعة الذرة.

اذا قمت بضرب هذا في 3 ووجهت اشعة الليزر من الشمال والجنوب والشرق والغرب ومن الاعلى ومن الاسفل فانك سوف تحصل على ما يسمى بدبس السكر البصري. اذا مشيت حول قدر مليء بدبس السكر، فاي اتجاه تسلكه فان دبس السكر يعرف ان هذا الاتجاه الذي يجب ان يدفع ضده. انها نفس الفكرة.

يمكنك ان تبرد الذرات بشكل كبير جدا بهذه الطريقة. نحن نقوم بكل تجاربنا في صندوق زجاجي صغير. تعمل اشعة الليزر على دفع الذرات إلى وسط الصندوق الصغير هذا وتبردها. الذرات تصبح باردة جدا لدرجة حرارة تصل الى $10\mu\text{K}$ وكثافات تصل إلى 10^{11} ذرة لكل سنتيمتر مكعب، مما يعني ان كثافة فراغ الطور هو 10^{-5} بالوحدة الطبيعية.

Radiation Pressure force



Cooling (slowing)

Doppler Shift $\implies \Delta\nu$ depends on v
 $\implies F(v)$

Trapping

Zeeman shift, $B(x)$ $\implies \Delta\nu$ depends on x
 $\implies F(x)$

الشكل 5. كيف يعمل التبريد بالليزر.

الكثافة المطلوبة لتكاثف بوز اينشتين هي واحدة من هذه الوحدات. وبالرغم من ذلك حتى في حالة ما تكون الذرات باردة بدرجة غير عادية وكثافة عالية للبخر البارد جدا، الا انهم لازالوا بعيدين عن تكاثف بوز اينشتين.

ما الذي يمنعهم من ان يصبحوا اكثر بوردة، بالمناسبة، ان حركتهم هي حركة براونية. لنفترض ان لديك حبيبات من الدخان تتحرك: فان الهواء يبدو لزج بالنسبة لها وبسرعة تقل سرعتها. يعمل الهواء مثل دبس السكر لحبيبة الدخان الصغيرة. ولكن لا توقف حركتها بالكامل. في هذه الحالة، اذا نظرت إلى حبيبة دخان تحت الميكروسكوب، ستشاهد انها تتحرك.



لماذا تتحرك؟ انها تقوم بذلك لان طبيعة الهواء المنفصلة. فكتل (جزيئات) الهواء العشوائية تصدم حبيبة الدخان من جهة الى جهة اخرى.

الضوء كما تعلم ايضا يأتي في صورة كتل تسمى الفوتونات، وهذا يعطي نفس تأثير الهواء على حبيبة الدخان ويتسبب في الحركة البراونية. يمكن الحصول على السرعة الادنى النهائية في دبس السكر البصري هو مشابه تماما للحركة الخفيفة للدخان والتي تبدو انها متوقفة في الهواء.

التبريد بالليزر هو الخطوة الاولى. حيث تعتبر منتصف الطريق إلى تكاثف بوز اينشتين. الان نحن نحتاج الى نوع جديد من التبريد. ولحسن الحظ اناس مثل Bill Phillips في المجموعة هنا على سبيل المثال قدم لنا طريقة مختلفة للامساك بالذرات.

عندما نقوم باغلاق شعاع الليزر! فان الذرات سوف تسقط تحت تأثير الجاذبية العادية. اذا لم يكن هناك قوى مؤثرة عليهم، فانهم سوف يسقطون تحت تأثير الجاذبية. واذا لامسوا جدار الصندوق، فانهم سوف يتجمدوا هناك. نحتاج إلى ان نمسكهم عن الحركة. لحسن الحظ ان الذرات لا تتحرك بسرعة كبيرة: مع الوقت الذي يتعرضوا فيه لاشعة الليزر للتبريد في دبس السكر البصري، فانهم فقط يتحركون بضعة سنتيمترات في الثانية. وبالتالي فانهم محصورين بواسطة مجال مغناطيسي ضعيف (انظر الشكل 6).

كل ذرة قلوية والروبيوم في حالتنا له الكترونين غير متزاوجين بعزم مغناطيسي، في اتجاه معاكس لاتجاه غزل الالكترتون. تتفاعل العزوم المغناطيسية مع المجال المغناطيسي، وعليه يمكن استخدام المجالات المغناطيسية لتحريك الذرات.

في الحقيقة، اذا العزم المغناطيسي للألكترون، موازيا للمجال المغناطيسي، فانه يجذب موقع تكون فيه قيمة شدة المجال المغناطيسي ادنى ما يمكن، ويتمركز عندها.

يمكننا ايضا ان نرتب الامر بحيث نؤثر بقوة تنافر في موقع المجال الادنى من خلال عكس اتجاه العزم المغناطيسي. ولكن اذا كان عزم الالكترتون موجها في الاتجاه الصحيح، فان المجالات المغناطيسية يمكن ان تترتب بحيث تشكل تجويف صغير، والذرات تحجز في هذا التجويف الصغير.



هذا التجويف رائع لانه يمكن استخدامه كمبرد يعرف باسم التبريد بالتبخير (evaporative cooling). هذا النوع من التبريد اكتشف في MIT واستخدم على اصطياد وحجز الهيدروجين ذو العزم المستقطب. انها فكرة رائعة. انها الاكثر سخونة في البرودة!.

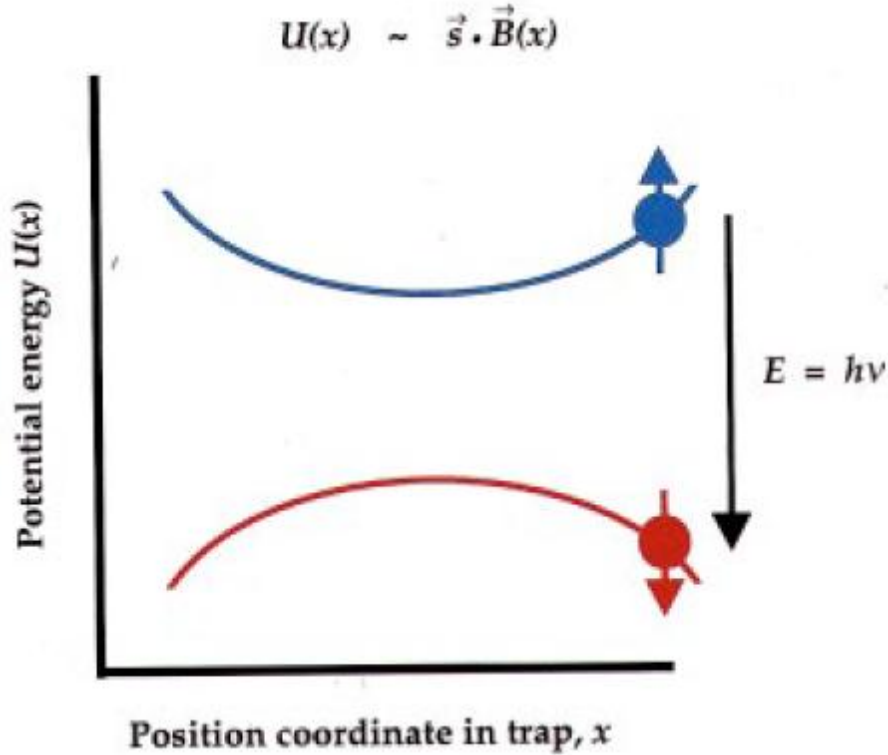
ولكن ببعض الاحساس، انها احدى اقدم طرق التبريد. في أي وقت تحصل فيه على فنجان من القهوة، فانه يبرد بالتبخير. اذا حصلت على فنجان قهوة من محل قهوة تشربه وانت خارج المحل فان القهوة سوف تبرد بسرعة اذا لم تبقي الغطاء على الفنجان. هذا البخار الذي تشاهده يخرج هو موجود بسبب التبريد بالتبخير (انظر الشكل 7).

طريقة التفكير بذلك هو ان الفنجان يحتوي على كمية كبيرة من جزيئات القهوة تمتلك طاقات مختلفة.

بعض من جزيئات القهوة يمتلك الطاقة الكافية ليتمكن من ان يكسر رابطة تعرف بشكل تقني بادالة الشغل للقهوة. هذه الجزيئات تكسر حاجز الطاقة الصغير عند السطح.

الجزيئات التي لها القدرة على التبخر هي تلك التي تمتلك طاقة اكثر من متوسط طاقة جزيئات القهوة. وبالتالي عندما تخرج هذه الجزيئات الى الخارج فان الجزيئات التي تبقى تلك التي تمتلك طاقة اصغر من الطاقة المتوسطة لجزيئات القهوة. وتصبح القهوة ابرد.

هذا شيء نحن نعرفه جيدا ومألوف لنا. ولكن ربما لم نفكر به على هذا النحو من قبل ونعتبرها طريقة رائعة للتبريد ذات كفاءة عالية.



الشكل 6. المبدأ الأساسي للمصيدة المغناطيسية للذرات. المجال المغناطيسي له قيمة صغيرة. ذرة لها غزل يوازي المجال المغناطيسي (أي عزم الذرة المغناطيسي في اتجاه معاكس للمجال المغناطيسي) يجذب إلى هذه القيمة الصغيرة، للعزم المعاكس للمجال المغناطيسي، فان الذرة تنفر من القيمة الصغيرة. انقلاب الغزل يمكن ان يحدث تحت اثاره كهرومغناطيسية عند تردد الرنين $\nu = E/h$ الذي يتطابق مع فرق الطاقة E بين اتجاهي الغزل كما هو موضح (h هو ثابت بلانك). يقع تردد الرنين في منطقة الراديو من الطيف الكهرومغناطيسي، وقيمتها الدقيقة تعتمد على الموقع داخل المصيدة او التجويف.

إذا اشترت فنجان قهوة لتشربها وانت في الطريق، فانه يأتي في كوب بلاستيكي عازل، وبالتالي فان معظم الحرارة تتسرب للخارج من خلال البخار. درجة حرارة القهوة قريبة من 370 K و 373 K.

إذا لم تقم بوضع الغطاء عليه، فانه خلال فترة زمنية قصيرة يبرد إلى درجة حرارة 300 K. أي ان درجة الحرارة تغيرت بمقدار 20%.

إذا تركت القهوة على المكتب تبرد سوف تشاهد صبغة داكنة تظهر على الجدار الداخلي لكوب القهوة. هذه الصبغة الداكنة تخبرك بعدد الجزيئات التي تسربت من القهوة بسبب التبخر، وقد تبين انها تشكل 2% فقط من



الجزئيات في الكوب، حتى تقل درجة الحرارة بنسبة 20%. افترض انك خسرت 2% اخرى من الجزئيات وانخفضت درجة الحرارة 20% اخرى وهكذا؟

هذا يوضح ان مقياس درجة حرارة القهوة يصل لقوة العشر من عدد الذرات المتبقية في كوب القهوة. هذه طاقة كبيرة جدا. في الحقيقة نحن جميعا نعلم، اذا لم نحافظ على بقاء الغطاء على الكوب فانه في الوقت الذي تصل فيه المنزل فان القهوة تبرد بسرعة لتصل الى الصفر المطلق!

حسنا انها حقيقة لا تبرد الى درجة الصفر المطلق. ربما فكرت متعجبا لماذا. اخرج الى الصحراء حيث يكون التركيز المولاري للقهوة في الهواء الجوي يساوي صفر. بعد لا زالت القهوة لا تصل إلى هذه الدرجة من البرودة. انها تتوقف بعد فترة من الزمن.

السبب في هذا هو بعد ان تبرد القهوة كفاية فانه لا توجد ذرات كافية بقت بطاقة كافية لكسر دالة الشغل للقهوة. وعند هذه المرحلة فان معدل التبريد بالتبخير ينعدم.

في تجاربنا نفس الشيء يحدث. وضعنا ذرات في تجويف وقمنا بنزع الغطاء عنه. ان جاز التعبير. وضعنا حافة في التجويف لتحدث تشويش بسيط. وبعد ذلك فقط الذرات التي تمتلك طاقة اضافية يمكنها ان تخرج من الحافة. الذرات المتبقية تمتلك طاقة متوسطة منخفضة وتبرد (انظر الشكل 8).

الشيء العظيم هو انه مع تبريد الذرات فان المصيدة تكون في حالة تشويش مستمر، وذلك حتى مع برودة الذرات، ارتفاع الحافة بالنسبة لمتوسط طاقة الذرات لا زال اكبر بمرات قليلة من متوسط الطاقة.

في الواقع، نحن نقلل دالة الشغل اصطناعيا بحيث يستمر انخفاض درجة حرارة الذرات.

بينما تبرد الذرات فانها تشغل حيز اصغر فاصغر لانها لا تملك الطاقة الكافية للتحرك بعيدا في التجويف. ولهذا فان كثافتها تزداد حتى مع انخفاض درجة حرارتها.



الشكل 7. التبريد بالتبخير في JILA

هذا بالتحديد ما نريد ان يحدث للحصول على تكاثف بوز اينشتين.

المصيدة التي استخدمناها تمتلك قاع مدبب. كلما نقوم بهز القاع نحصل على جهد تحديد دائري له شكل قطع مكافئ. نسمى هذا مصيدة TOP وهي اختصار لـ $\text{time-averaged orbiting potential}$ أي المتوسط الزمني للجهد المداري. انه يغزل حول القمة انها مصيدة عظيمة.

الان سوف اقدم لكم ملخصا عن التجربة بالكامل. في البداية قمنا بتجميع الذرات باستخدام اشعة الليزر ومصيدة ضوئية مغناطيسية (magneto-optic trap وتعرف اختصارا بـ MOT). ومن ثم قمنا بتبريدها باستخدام طريقة دبس سكر بصري (optical molasses).



قمنا بعملية ضخ ضوئي وضع كل الذرات في نفس حالة الغزل بحيث انهم اصبحوا بنفس الترتيب مع المجال المغناطيسي وانجذبوا إلى القيمة الدنيا الموضعية.

ومن ثم وبسرعة كبيرة قمنا بتشغيل المصيدة المغناطيسية وبدأنا عملية التبريد بالتبخير. سمحنا للذرات بالخروج بواسطة تطبيق مجال مغناطيسي متغير بتردد راديو RF عمل على تحويل الذرات من حالة الغزل للأعلى حيث تنجذب إلى المجال المغناطيسي الأدنى إلى حالة الغزل للأسفل التي تتنافر وتبتعد عن المصيدة.

فكر في احد الذرات الساخنة. انها تطوى للاعلى على جانب التجويف، وتصبح في حالة رنين مع التردد الراديو RF ويحدث لها انتقالات في الغزل، ومن ثم تسقط في التجويف. بتقليل تدريجي لتردد المجال المغناطيسي الراديو فاننا نحرك الموقع الفعلي لشريحة التجويف للداخل في اتجاه المركز.

التردد الراديو للمجال المغناطيسي هو اداة التحكم التجريبي، حيث يعمل على تشريح عميق واعمق في السحابة الالكترونية، يصل إلى الذرات الباقية ويبردها حتى نصل لدرجات حرارة منخفضة.

يوضح الشكل 9 الاجهزة المستخدمة. الكثير من الناس خابت توقعاتهم عندما زاروا مختبرنا. لان لدينا اجهزة للوصول لاقل درجة حرارة ممكنة على مستوى العالم، الا انهم تعجبوا وتساءلوا اين هو النيتروجين المسال. اين هو الهيليوم المسال؟ اين البخار الذي يغلي؟

في الحقيقة، كل شيء في التجربة عند درجة حرارة الغرفة، حوالي 300 K، ما عدا الذرات التي هي عند درجة حرارة 300 nK. كل شيء يحدث داخل الغرفة الزجاجية في مركز الشكل. الغرفة الزجاجية قطرها 2.5 cm.

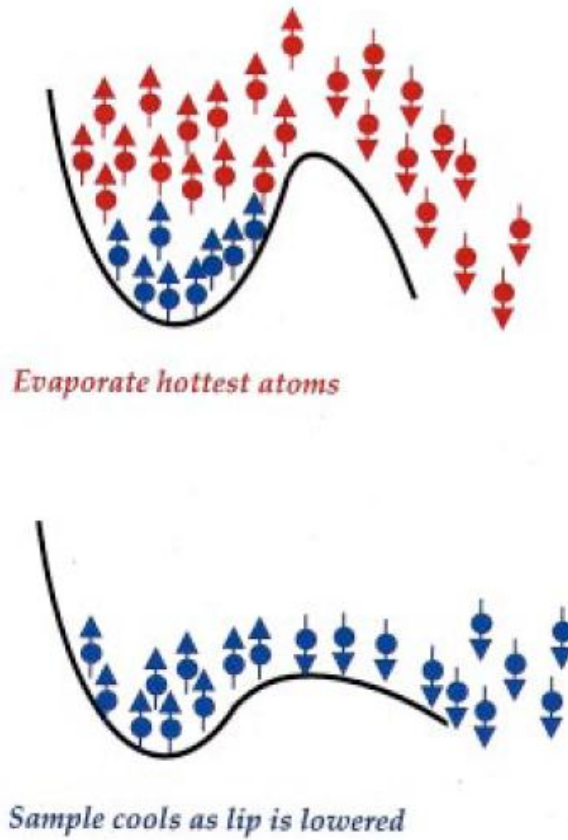
الملفات في اعلى واسفل الغرفة الزجاجية تولد المجال المغناطيسي. بعض الملفات الاضافية واوراق السلفان تم رفعها من الصورة حتى تستطيع ان ترى داخل الغرفة الزجاجية نفسها.

الشيء الاخر في هذه الصورة والذي يعتبر الاهم هو العدسة. يمكنك ان تفكر في هذه العدسة على انها عدسة شبيئية لميكروسكوب للنظر من خلالها للذرات.

مشاهدة الذرات في الضوء يعطينا كل المعلومات الممكن استخلاصها منها. لا يمكننا ان نذهب في الداخل ونلمسها باستخدام مقياس حرارة تقليدي، لان مثل هذه المقياس الحراري سوف يعمل على تسخين الذرات بشكل كبير وربما يصل لدرجة الغليان.

يوضح الشكل 10 كيف اخذنا صورة للذرات. شعاع ليزر بتردد رنيني مع الانتقالات الذرية ارسل في سحابة الذرات. الذرات عملت على تشتيت ضوء الليزر في كل الاتجاهات. ولهذا فان شعاع الليزر خرج وبه ظلال. قمنا بتصوير تلك الظلال على مصفوفة CCD أي charge-coupled device. المساحات المعتمدة تقابل المناطق التي فيها كثافة ذرات عالية. أي لدينا قمية كثافة ذرية عالية على امتداد خط البصر. حافة الصورة حيث الظلال غير معتمدة جدا تقابل حافة السحابة الذرية – الكثافة الكلية للذرات على امتداد هذا الخط اقل.

قمنا باستخلاص كل المعلومات الثيرموديناميكية ذات العلاقة من هذه الصور بالطريقة التالية. حيث ان شكل الجهد هو قطع مكافئ، نعمل كم هي قوة الجهد التي تمسك الذرات. لان السحابة تتصرف كغاز مثالي فان حجمها يخبرنا كم هي ساخنة تلك الذرات. قمنا بقياس حجم السحابة وحددنا درجة حرارتها.



الشكل 8. تردد راديوي للتبريد بالتخير للذرات المحصورة. التردد الرنيني (انظر الشكل 6) اختير لطرد اكثر الذرات سخونة والتي يمكن ان نجدها في اعلى التجويف ومن ثم تتناقص بالتدرج حتى نمسح كل الذرات الحارة في العينة.



ومن ثم نحدث بعض التبخير. نشغل ما يسمى بشفرات تردد الراديو (scalpel) وهي عبارة عن مجال مغناطيسي بتردد راديو وقد تحدثت عنه قبل قليل. نقوم بتشريح حواف السحابة، ومن ثم نتوجه اعمق واعمق في السحابة. اذا تمت هذه العملية ببطء شديد، فان السحابة تنكمش بعيدا عن الشفرات، وتصبح السحابة اصغر كثيرا. على سبيل المثال، اذا السحابة اصبحت اصغر بعشرة مرات في البعد الخطي فانها تصبح ابرد بمائة مرة.

اذا نلاحظ ان حجم الظل يعطي معلومات ثيرموديناميكية مفيدة عن السحابة، وكذلك الحال بالنسبة لعتامة الظل. اذا اصحبت السحابة اصغر بعشرة مرات في البعد الخطي ولكن ظلها بقي على نفس درجة العتامة، فان هذا يعني ان الكثافة الذرية يجب ان تزداد بمقدار 10 مرات. لانها ايضا بردت بمقدار مائة مرة، وقد حصلنا على زيادة بمقدار اربعة مرات في مقدار كثافة فراغ الطور. هذه اعداد نموذجية لنظامنا. كذلك علي ان اذكر ان زيادة مماثلة تعود إلى التبريد بالتبخير لوحظت ايضا من قبل مجموعة Randy Hulet في جامعة رايز ومن قبل مجموعة Wolfgang Ketterle في MIT ومجموعة MIT رصدت حديثا تكاثف بوز اينشتين بالتبريد بالتبخير لغاز من ذرات الصوديوم.

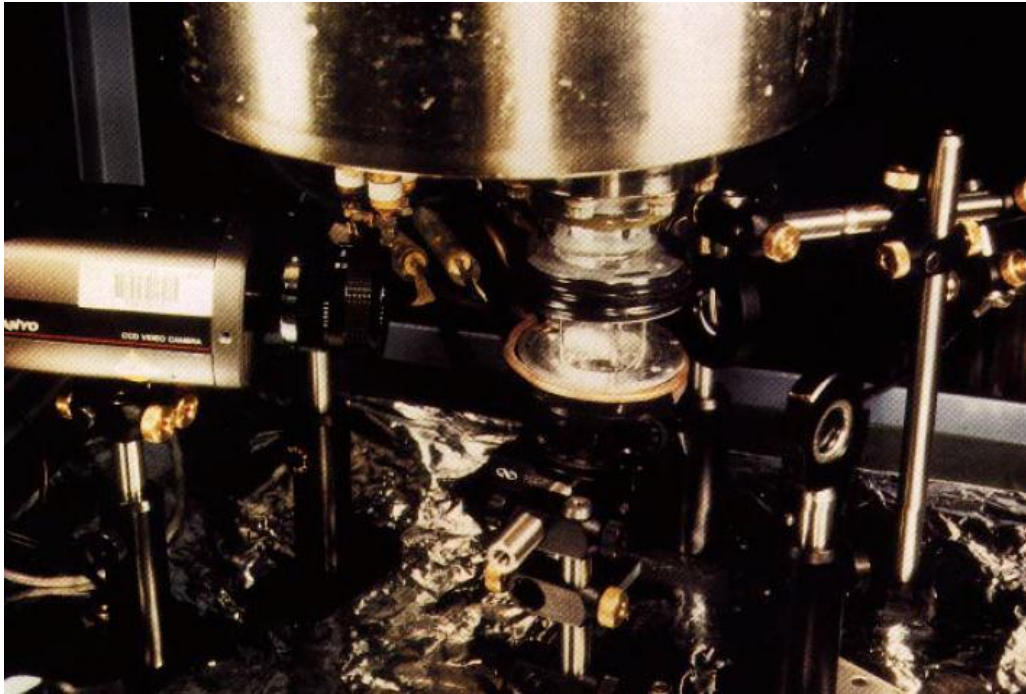
سحابتنا التي تبخرت الان قريبة جدا من الوصول إلى تكاثف بوز اينشتين. ولسوء الحظ، السحابة صغيرة جدا، قريبة من حد القدرة التحليلية لانظمة التصوير لدينا. لذلك قررنا ان نصنع سحابة اكبر قبل ان نأخذ صورتها.

قمنا بذلك بتقليل بطيء في البداية لثوابت الزنبرك في قصيدة القطع المكافئ ومن ثم بشكل مفاجيء، قمنا باغلاق المصيدة. وجدت الذرات نفسها في فراغ حر. ماذا فعلت الذرات بعد ذلك؟ امتلكت الذرات سرعة انطلقت بعيدا عن بعضه البعض. بعد ان استمر هذا الامر لفترة من الزمن اصحبت السحابة اكبر بكثير وبمكاننا ان نأخذ صور لها.

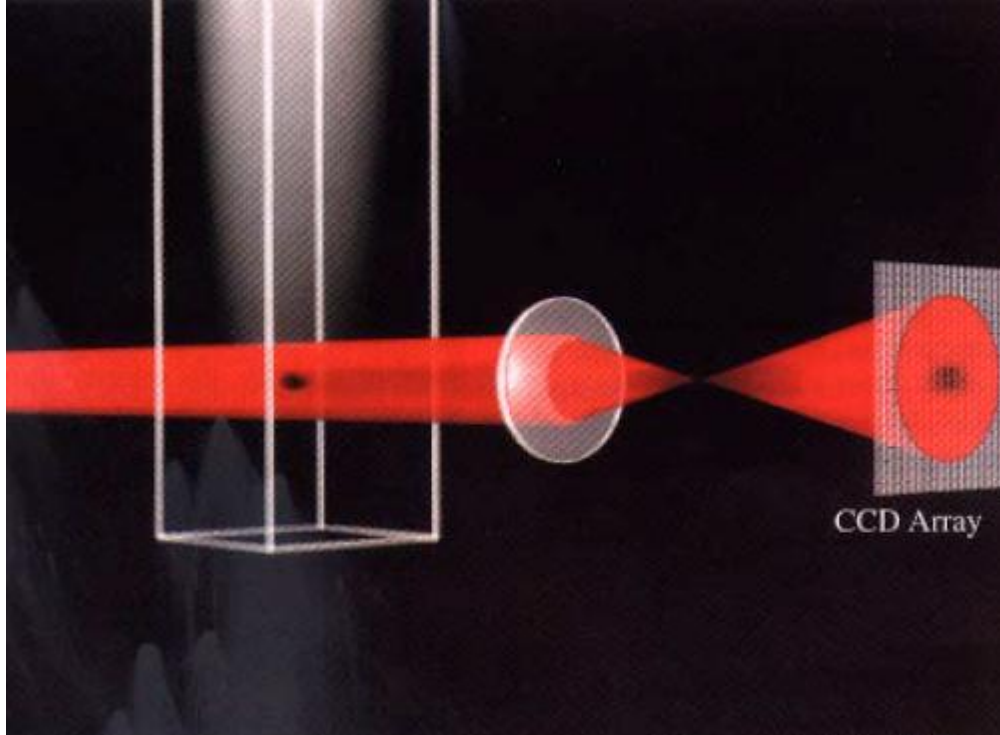
وحيث اننا نعلم كم هي الفترة الزمنية التي تبقى فيها الذرات متطايرة بعيدة عن بعضها البعض يمكننا القيام بقياسات زمن التحليق (time-of-flight) لحساب سرعاتها. الذرات في الجزء الخارجي من السحابة يجب ان تكون لها سرعة كبيرة جدا عند تحريرها، والذرات القريبة من وسط الصورة تقريبا مستقرة. ولهذا فان هذه الصورة توضح سرعة توزيع الذرات في السحابة عند لحظة تحريرها، بدلا من توزيعها المكاني. وقد تبين لا يوجد فرق كبير بين الحالتين لمصيدة القطع المكافئ التي استخدمناها في تجاربنا، التوزيع المكاني وتوزيع السرعة متناسبين.

الآن دعونا نطرح تساؤل ماذا نتوقع ان نشاهد. الشكل 11 يوضح تكاثف بوز اينشتين بشكل فني. قبل ان نبرد اقل من درجة الحرارة الحرجة، تكون الذرات موزعة حراريا على كل المستويات المختلفة. اذا اخذت صورة لها، سوف تبدو ككرة كبيرة. اقل من درجة الحرارة الحرجة لدينا عدد كبير من الذرات تشغل ادنى مستوى طاقة. في المذبذب التوافقي اقل مستوى طاقة هو الاكثر تمركزا في كلا من محاور الفراغ وفراغ السرعة. الذرات في القاع لا تتحرك كثيرا وكلها متماسكة مع بعضها البعض. لذلك اذا اخذت صورة للسحابة، سوف نرى بقعة كثيفة في الوسط. مقطع عرضي لتوزيع الكثافة يوضح لنا وجود قمتين: قمة عريضة وكبيرة لسحابة الذرات الحرارية وقمة حادة للسحابة المتكاثفة. الان نحن ننظر لمثل هذا الشكل اثناء انخفاض درجة حرارة النظام، املين ان نرى زيادة مفاجئة في الكثافة في وسط السحابة.

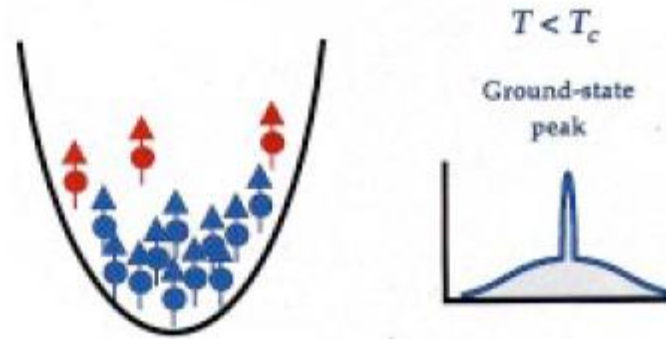
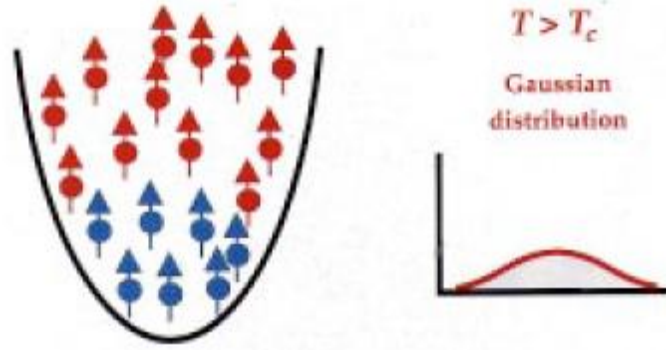
هذا موضح في الشكل 12 الذي يبين الكثافة المركزية كدالة في تردد شفرات RF. عندما يقل التردد فاننا نقطع في عمق السحابة. ويمكنك ان ترى ان كثافة السحابة تزداد ببطء كلما بردنا اكثر، وهذا نتيجة لعملية التبخر العادية.



الشكل 9. معدات التجربة في JILA



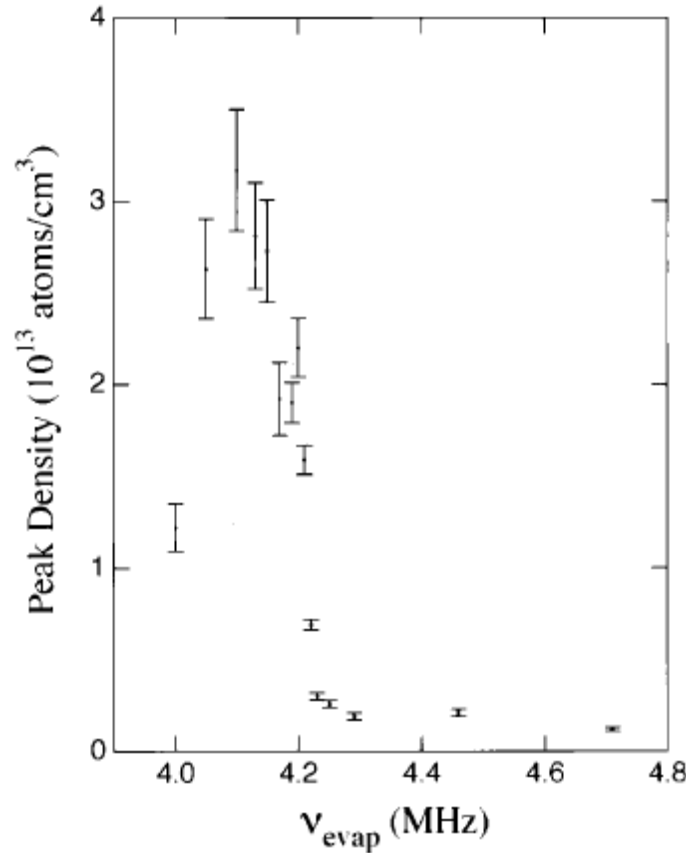
الشكل 10. كيف تم تصوير السحابة الذرية



الشكل 11 التوزيع المكاني للذرات في السحابة الممتدة، فوق واسفل درجة حرارة الانتقال T_c . لـ $T > T_c$ الذرات موزعة على العديد من مستويات طاقة النظام، ولها توزيع جاوسيان للسرعة، ولـ $T < T_c$ فان تركيز الذرات في الحالات الاقل طاقة يعطي قمم ملحوظة في التوزيع عند سرعات منخفضة.

ثم وبشكل مفاجئ نصل إلى نقطة حرجة، والكثافة ترتفع كثيرا. هذه هي تكاثف بوز اينشتين! (من المهم ان نلاحظ انه اذا اردنا ان نبقي التقطيع في عمق السحابة، فان الكثافة سوف تنخفض مرة اخرى، لان الشفرات تبدأ بالقطع في التكاثف نفسه). يوضح الشكل 13 ثلاثة سحب تبرد بشكل مطرد عند التقطيع عميقا. السحابة الأولى هي سحابة حرارية ويمكنك رؤية انها دائرية وناعمة واكبر من الاخريات. عندما نبرد هذه السحابة اكثر قليلا، تظهر قمة في المنتصف تماما. وهذا يناظر الذرات التي لا تتحرك ابدا. وهنا يظهر التكاثف. يمكنك ان ترى ان لدينا مركبتين للسحابة. الهيليوم الفائق السيولة يظهر نفس الشيء حيث يتواجد السائل العادي والسائل الفائق.

إذا استمر التبريد أكثر فاكتر، نتخلص تماما من السحابة العادية ويتبقى لنا حالة تكاثفة نقية. الاطار في اقصى يمين الشكل 13 هو حجم جاهري (ماكروسكوبيك) يمكنك ان تراه بعينيك. البعد الطويل لهذه السحابة يبلغ 40 μm إلى 50 μm . أي انه اكبر بكثير من الطول الموجي للضوء. هذه الصورة هي الصورة الحقيقية لحالة جاهرية مفردة مشغولة بدالة موجية. هناك 1000 او 2000 ذرة تشارك في هذه الدالة الموجية، كلها تقوم بنفس الشيء.



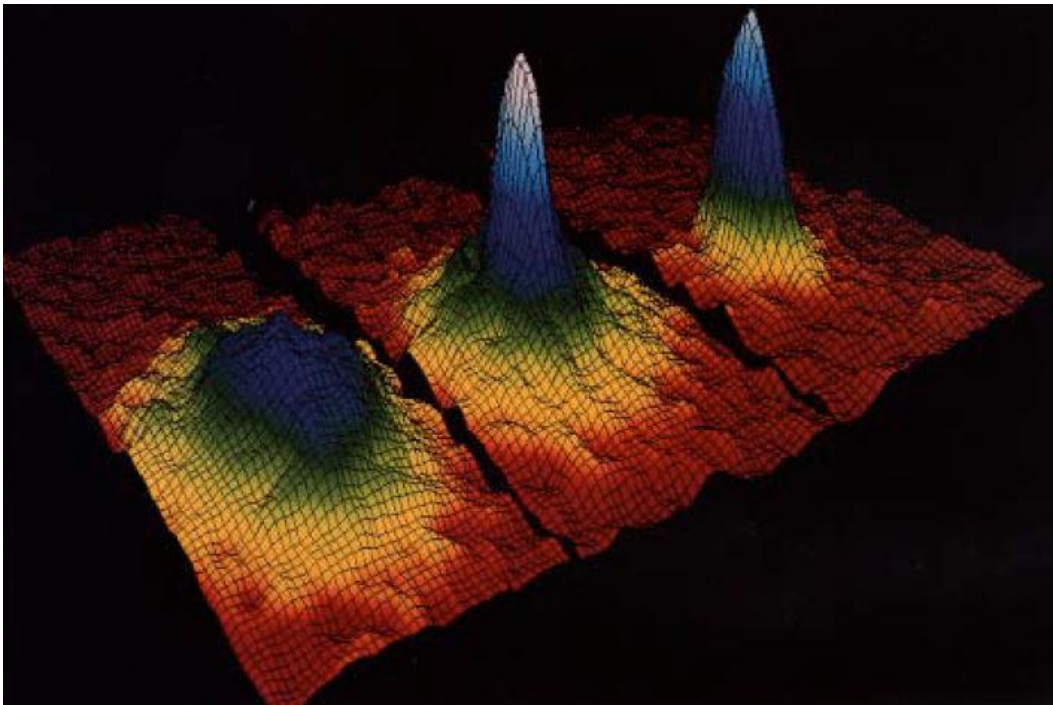
الشكل 12 الكثافة الذرية كدالة في تردد RF المبرد بالتبخير

هنا لدينا شيئين مهمين يمكن ان نراهم حول هذه السحابة. على سبيل المثال لاحظ ان السحابة الحرارية دائرية في حين ان سحابة التكاثف بيضاوية. الشكل 14 يوضح نفس البيانات عندما ننظر لها من الاعلى، مرة اخرى السحابة الحرارية دائرية ولكن سحابة التكاثف بيضاوية. يشير الشكل الدائري للسحابة الحرارية إلى ان توزيع السرعة للذرات متماثل في كل الاتجاهات. هذا ببساطة ما تخبرنا به الميكانيكا الاحصائية الاساسية: تقول نظرية التوزيع المتساوي ان بغض النظر عن شكل المصيدة فان توزيع السرعة يجب ان يكون متماثلا

في كل الاتجاهات. في الحقيقة، الجهد الذي يمسك الذرات ليس متماثلاً كروياً، ولكنه اسطواني التماثل. تعصر الذرات أكثر فاكثراً على امتداد محور تماثل المصيدة (المحور الأساسي) وتكون أقل تماسكاً في الاتجاه العمودي على المحور (المحور القطري)

بالمقارنة مع السحابة الحرارية توزيع السرعة في حالة التكاثر ببيضاوي وليس كروي.

ماذا يحدث هنا؟ يمكن أن تشرح بواسطة مبدأ الشك لهيزنبرج. الذرات في حالة التكاثر ليست أجساماً حرارية على الإطلاق. التكاثر يكون في أسفل قاع المصيدة.



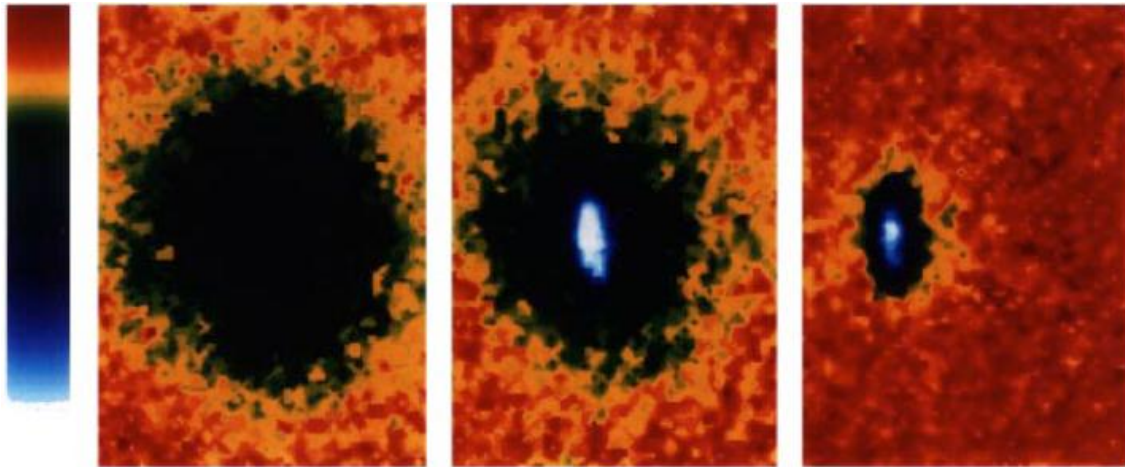
الشكل 13. صور توزيع السرعة للذرات المحصورة، أخذت بطريقة التمدد. الإطار الأيسر يوضح توزيع السرعة قبل ظهور تكاثف بوز أينشتاين، والإطار في الوسط لتوزيع السرعة لحظة ظهور التكاثر، والإطار في أقصى اليمين بعد المزيد من التبخر الذي يترك العينة في حالة تكاثف نقي. مدى الرؤية لكل إطار هو $200 \mu\text{m} \times 270 \mu\text{m}$ وهذا يقابل المسافة التي تحركتها الذرات خلال فترة زمنية مقدارها $1/20 \text{ sec}$. اللون يعكس عدد الذرات في كل سرعة، حيث أن اللون الأحمر هو الأقل والأبيض هو الأكثر. المساحات التي تظهر باللون الأبيض والأزرق تشير إلى السرعات الأدنى.



التكاثف اصغر على امتداد الاتجاه المحوري من الاتجاه القطري لان القوى المحورية للمصيدة اكبر. ماذا يمكن لمبدأ الشك ان يخبرنا حول هذا الشيء؟ انه ينص على اذا كنا نعلم تماما اين الجسم المكتم يكون فاننا لا نعرف شي عن سرعته، وعلى الجانب الاخر اذا كنا نعلم شيء بسيط عن مكان الجسم فاننا نملك فكرة بسيطة عن سرعته. اذا تزامت الذرات في ابعاد الفراغ، فانها سوف تنتشر خارجا في فراغ كمية الحركة، والعكس صحيح. في الحقيقة نحن نحصل على عرض عملي لمبدأ الشك عندما نغلق المصيدة، وندع الذرات تتطاير بعيدا عن بعضها البعض، ونأخذ صورة لتوزيع كمية حركتها. بالتأكيد السحابة كانت مضغوطة في البداية في الاتجاه المحوري، والان منتشرة اكثر في هذا الاتجاه. وهذه هي ميكانيكا الكم على نطاق واسع.

حسنا، لنلخص الموضوع. انا لم اذكر الكثير من الارقام لانها صغيرة جدا ولا تعني الكثير. ولكن لهؤلاء المهتمين، عندما يحدث التحول فان درجة الحرارة كانت حوالي 100 nK والكثافات حوالي 5×10^{12} ذرة لكل cm^3 . هذا يعني ان السحابة مخلخلة بشكل غير اعتيادي عن القيم القياسية المعروفة. انها اقل برتبة اكثر من 10 مرات عن كثافة أي مادة صلبة واقل بكثير جدا من كثافة الهواء الذي امامك. أي انه السحابة مخلخلة جدا. والسبب الوحيد اننا نستطيع ان نراها بشكل جيد ان الذرات تشتت الضوء بقوة كبيرة.

بعد ان ننتقل الى درجة حرارة اقل من درجة حرارة التحول، كل الذرات تتكوم في الوسط. الكثافة تصبح اعلى بكثير. ودرجة الحرارة تصبح من الصعب ان تحدد ولكن اذا اردت ان تطلق عليها رقم فانه حوالي الصفر المطلق، لان كل الذرات في نفس الدالة الموجية، ولا يوجد انتروبي هناك. انها درجة حرارة منخفضة. عندما تتطاير الذرات بعيدا عن بعضها البعض، يمكنك الحديث عن متوسط طاقتها الحركية، والتي استخدمت للربط مع درجة الحرارة. على الاقل نحن نستطيع ان نسماها درجة حرارة. ان قيمتها الان اقل من نانوكلفن واحد. لاستعير تعبير بيل جادزيك بالوصول الى 500 pK فاننا نقوم بفيزياء بيوكلفن او فيزياء نصف نانو كلفن. حسنا ماذا بعد؟



الشكل 14. البيانات في الشكل 13 كما ينظر لها من الاعلى معروضة بالوان للتوضيح

خواص تكاثف بوز اينشتين ليست معروفة تماما. عندما اتيت إلى NIST هذا الصباح لاحظت بوستر لحدِيثي الذي سالقيه وقد لاحظت كم هو مرعب تلك الخلاصة التي كتبتها وقد وعدت ان اقوم بشرحها. وفكرت ربما كنت متفائلا جدا عندما كتبت هذه الخلاصة.

هناك بعض الاشياء تكون واضحة جدا. لديك كل المجموعة من الذرات. كلها تقوم بنفس الشيء بالضبط. كلها تتشارك في نفس الدالة الموجية. انها تتداخل. انها ليس بالضرورة ان تكون قريبة جدا من بعضها البعض كما في الحالة الكلاسيكية عندما تشغل الذرات حجم صغير. في الحقيقة متوسط الكثافة لحالة التكاثف لدينا كانت منخفضة جدا – واحد على مليار من كثافة المواد الصلبة او السائلة العادية. ولكن الذرات المتكاثفة مترابطة، ماذا يعني هذا؟

لنتحدث عن بعض التجارب التي بإمكاننا القيام بها. من الاشياء الجميلة حول العديد من هذه التجارب هو اننا لا نعرف ماذا سوف يحدث، مما يجعلهم تجارب مثيرة.

في البداية، علي ان انوه إلى ان هناك عائلتين في الفيزياء لهما علاقة بحالة تكاثف بوز اينشتين. احدهما هي الهيليوم المسال فائق الميوعة، الهيليوم البارد جدا والذي لزوجته انعدمت بالكامل. العائلة الاخرى هي الليزر. في العادة نحن لا نفكر في الليزر على انه حالة تكاثف بوز اينشتين ولكن هنا طريقة لرؤية ذلك.



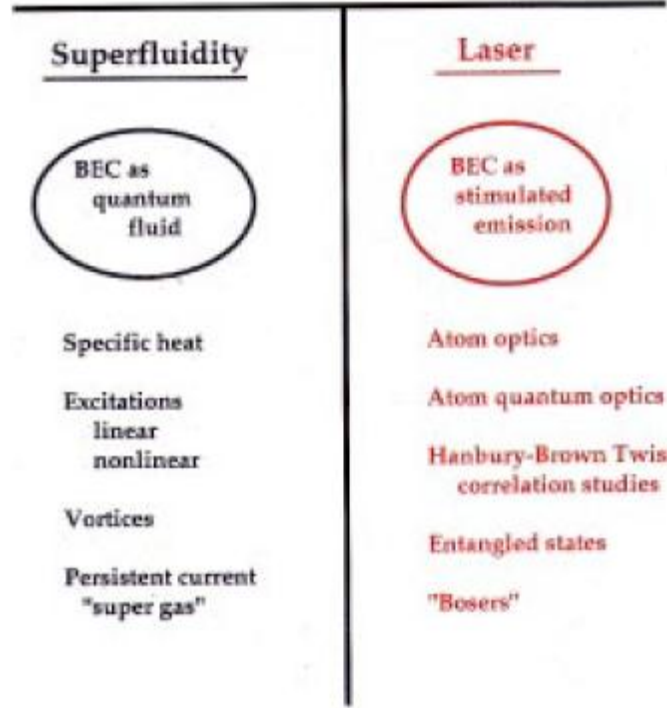
فكر في الليزر بدلالة التجويف والمرايا على كل طرف تحتوي على عدد كبير من الانماط الاهتزازية العادية من المجالات الكهرومغناطيسية. عندما تتحقق شروط عمل الليزر، لدينا كل الفوتونات كلها في نفس النمط. انها تشبه كثير حالة تكاثف بوز اينشتين للفوتونات.

الان نستخلص من الميوعة الفائقة والليزر تجربتين جديدتين (انظر الشكل 15). بداية يمكننا ان نقوم بتجارب مناظرة للدراسات الكلاسيكية عند مواعيد درجة حرارة منخفضة. يمكننا النظر في التغير في الحرارة النوعية المرتبطة بتكاثف بوز اينشتين، في الهيليوم المسال على سبيل المثال، التغير في الحرارة النوعية يعرض سلوك غريب يعرف باسم انتقالات لمبدا (λ transition). يمكن النظر على الاثرات التي تعكس كمية الامواج الصوتية في النظام الخطي. الصوت الاول شيء يدي الثاني والثاني وحتى الصوت الثالث موجود. هناك ظاهرة تناظر حالة التكاثف.

يمكننا ان ننظر إلى اثار متجمعة وقوية مثل الدوامات (vortices). علي ان انوه هنا ان هذه النظرية تم التحقق منها هنا في Gaithersburg. الدوامات تلك معروفة جيدا في الهيليوم المسال. اذا قمت بتدوير حاوية هيليوم مسال حول نفسها، فان دمامل صغيرة سوف تظهر في المائع، وتبقى حتى بعد توقف الحاوية عن الدوران المغزلي. انها ظاهرة مذهشة. اذا قمت برفع سداة حوض الماء (البانيو) وبدأت حركة دورانية للماء ومن ثم وضعت السداة مرة اخرى ورأيت الماء لازال يدور سوف تقول ان هذا غريب جدا. حسنا نحن نفكر في انه هذا ما يحدث في حالة تكاثف بوز اينشتين، اذا تمكنا من جعل الشيء يغزل حول نفسه. فاننا قادرين على تكوين تيارات دائمة في هذه المادة. لنسميها الغاز الفائق بالمقابل للموائع الفائقة والموصلات الفائقة، والتي تظهر تيارات دائمة من جسيمات اخرى.

على فكرة، انا مرتاح جدا مع الفكرة بان تكاثف بوز اينشتين في تجربتنا يمثل طور جديد من المادة، وانا احب ان احل نفسي من هذه الفكرة قليلا. لكل الاهداف يمكنك ان تفكر بالتكاثف على انه غاز. انه يمتلك نفس الترابط بين الجزيئات، انه يتصرف مثل الغاز بالنسبة للفيزيائيين. بنفس الطريقة الليزر لا يمثل نوع جديد من الطاقة، انه فقط ضوء. لذلك لا نقول ان الليزر نوع جديد من الطاقة نقول عنه ضوء مترابط. وبالتالي فان تكاثف بوز اينشتين هو غاز مترابط، او طبقا لما ذكرناه فهو غاز فائق.

Future directions
guided by two analogies:



الشكل 15 توجهات مستقبلية لبحاث تكاثف بوز اينشتين

الآن اريد ان اركز على انه بالنظر للتيارات الدائمة وشبهاتها، نحن لا نقوم فقط باعادة تجارب الهيليوم المسال الفائق الميوعة، لاننا ببساطة لدينا نظام مختلف تماما. كذلك لدينا مجسات جديدة، والتي بمختلف الطرق اكثر قوة. وكما نعلم، فانه من الممكن ان نرى الذرات المفردة. يمكننا ان نحلل توزيعات السرعة الذرية، وهذا شيء لم يكن في السابق ممكن القيام به على الهيليوم المسال. كما ان هناك اشياء لا نستطيع القيام بها. لا يمكننا ان ندخل مروحة صغيرة في التكاثف وتحريكه. ولكن لا بأس في ان نخسر قليلا ونربح قليلا.

احد الاختلافات الكبيرة بين انظمة الغاز الفائق والمائع الفائق/ الموصلات الفائقة التوصيل هو النظرية التي تقف خلفها. في غازنا الفائق، السحابة رقيقة جدا بحيث تستطيع ان تحسب بدقة ماذا سوف يحدث في النظام وهذا معروف من خلال نظرية الاضطراب، للخبراء في هذا المجال. الذرات بعيدة كفاية عن بعضها البعض وتفاعلاتها هي فقط اضطرابات في الغاز المثالي. يمكنك حساب سلوك التكاثف وان تفهمه بدون حسابات على نطاق واسع. اذا اردت ان تبالغ في الأمر، احب ان اقول هذا يوحد توجهاتنا، وفهمنا الشكلي لميكانيكا الكم لانظمة متعددة الاجسام.



الآن دعونا نذهب الى صورة الليزر. دعوني في البداية بطرح تساؤل – كيف تتكون تكاثف بوز اينشتين؟ انها شبيهة ومناظرة لليزر. في الليزر، لدينا مجموعة من مادة مثارة تطلق فوتونات. قبل ان يبدأ عمل الليزر، تطلق المادة الفوتونات في كل الاتجاهات. اذا وضعنا مرآيا حولها، بعض الفوتونات تصطدم بالمرآيا وتعود للخلف. وبعد برهة من الزمن تجد ان كل الفوتونات تقوم بنفس الشيء، وعندما تخرج فوتونات جديدة من المادة فانها تفضل ان تكون في نفس النمط الموجود بالفعل. الاحتمالية للفوتون ان يذهب فينمط يتناسب مع عدد الفوتونات الموجودة في ذلك النمط. وهذا لان الفوتونات هي بوزونات، مثل ذرات الروبيديوم.

الآن تستطيع ان ترى التناظر بين تكاثف بوز اينشتين والليزر. عندما تصطدم ذرتين روبيديوم مع بعضهما البعض، فانهما يذهبان في اتجاه جديد. انهم يفضلوا، اذا كان لهما الخيار، ان يذهبوا إلى واحدة من الذرات في المصيدة الذرية المشغولة بالفعل بهذه الذرات، لانه مثلما في حالة الليزر الاحتمالية تزداد طرديا مع عدد الذرات الموجودة بالفعل في هذا النمط. وبالتالي فان الطريقة التي يتكون فيها التكاثف هي ان نحصل على بعض الاهتزازات، تلك التي تضع بعض الذرات في قاع المصيدة. ومن ثم فان المزيد من الذرات سوف تسقط هناك وتحدث عملية تلقائية مثلما يحدث في الليزر.

هناك طرق كثيرة لدفع التناظر مع الليزر اكثر. بالاحص هنا في NIST فان الباحثون يعملون عملا مدهشا مع الذرات. اذا كان لديك تكاثف بوز اينشتين، يمكنك الان ان تبدأ بعمل اشياء مدهشة مع البصريات الكوانتية الذرية، مثل النظر في الترابط خلال فترات الزمن. ولا تنسى ان الليزر مصدرا جيدا للفوتونات. انه شديد وكل الفوتونات تقوم بنفس الشيء وتتحرك في نفس الاتجاه. هذا مشابهة للذرات في حالة تكاثف بوز اينشتين: الذرات كلها لها نفس الطاقة واذا قمت بغلق المصيدة فان الذرات جميعها سوف تصب في شعاع مثالي احادي اللون. يمكننا ان نستخدم هذا الشعاع في دراسات مناظرة لتلك التي تعتمد على الفوتونات في البصريات الكوانتية. وربما نستخدمها لانتاج حالات متشابكة، والتي لها اهمية خاصة في فهم القياسات الكوانتية. من الممكن ايجاد تطبيقات للتكاثف في مجالات تتطلب قياسات دقيقة جدا. اذا قمت بترجبة رنين على غاز تكاثف بوز، فان الاتساع غير المتجانس ينعلم بالكامل. نحن لن ندخل في النظاميات هنا ولكن القياسات الدقيقة هي شيء علينا ان نفكر حوله: الاتساع هو صفر. ولهذا نرى رنين ضيق جدا.

الطريقة المباشرة لعمل مثل هذه التجربة هي ان تسقط حالة التكاثف وتقوم برصد السحاب المتساقط. القياسات قد تستمر لفترة مرور السحابة مجال الرؤية للاجهزة المستخدمة. على مدى تلك الفترة اود ان اقول ان نبضة الذرات كانت محدودة بالتحول او الانتقال، وانتشار الطاقة محدود فقط بادوات رصد التجربة.



اذا كنت تفكر بطريقة لاخذ الذرات خارج المصيدة واحدة واحدة، سوف نحصل على شعاع متصل من الذرات لها طول مترابط (coherence length) كبير، بطاقة موزعة بشكل اقل من ان نحصل عليه في حد التحول. الناس تسمي هذه الامكانية بليزر الذرة (atom laser). في الليزر يمكنك ان تحصل على ضوء مترابط على امتداد مسافة اكبر من طول تجويف الليزر نفسه. بعض الناس تسمي ليزر الذرة بالبوزر Boser. انا لم اخترع هذا المصطلح.

شكرا لحسن استماعكم.

حول المؤلف: هو اريك كورنل فيزيائي متخصص في قسم فيزياء الكم في مختبر فيزياء التابع لمعهد القومي للتكنولوجيا والمقاييس، زميل في JILA وبروفيسور مشارك في قسم الفيزياء في جامعة كلورادو. بحوثه في تكاثف بوز اينشتين والبصريات الذرية وعلم الاطياف الدقيقة والتبريد بالليزر. يتقدم بالشكر لكل من تشارلز كلارك ومارك ايدوارد لمساعدتهما في اعداد هذا النص. المعهد القومي للتكنولوجيا والمقاييس هو وكالة ادارة التكنولوجيا في التابع لقسم التجارة للولايات المتحدة الامريكية

تمت الترجمة في المركز العلمي للترجمة

www.trgma.com

30-4-2011