

- シン, M. 他 Nature 631, 350–359 (2024).
- コウトリ, N. プラスカ州アン, フリーズします. 昆虫. 63.31–45 (2018).
- ハリソン, J.F. & ロバーツ, S.P. Ann. Rev. Physiol. 62, 179–205 (2000年)。
- ウェストニート, M.W. 他サイエンス 299, 558–560 (2003)。
- ロック, M. J. 昆虫生理学 44, 1–20 (1997)。
- Azad, P., Ryu, J. & Haddad, G.G. フリーラジカル. Biol. Med. 51, 530–538 (2011).
- Visidou, I. & Wood, W. FEBS J. 282, 1368–1382 (2015).
- Banerjee, U., Girard, J.R., Goins, L.M., Spratford, C.M. 遺伝学 211, 367–417 (2019)。

- ドゥジャック, J.P., 近藤, S., 上田, R., バグマン, C.M. & ルメートル, B. BMC Biol. 13, 81 (2015).
- Lu, A. 他. 頤. 生理. 5, 252 (2014)。
- センダー, R., フックス, S., ミロ, R. PLoS Biol. 14, e1002533 (2016年)。
- カイザー, A. 他 Proc. Natl Acad. Sci. USA 104, 13198–13203 (2007年)。

著者は利益相反がないことを宣言します。
この記事は2024年6月26日にオンラインで公開されました。

量子物理学

極性分子は捉えどころのない量子状態を形成する

ローリアン・チョマズ

長距離で相互作用する分子のガスがわずかなノケルビンまで冷却され、ボーズ・アインシュタイン凝縮と呼ばれる状態が出現しました。これはこの種の分子システムでは初めての現象です。289ページを参照してください。

30年前、物理学者は光と磁場を使って個々の原子の集合を制御することで興味深い量子状態を作り出した1

研究者らは、この気体状の原子群を極低温まで冷却することで、ボーズ・アインシュタイン凝縮、つまり物質の粒子（ここでは原子）が集まって巨視的な量子波を形成する状態を作り出した。この成果は、科学者が十分に制御され調整可能な設定で量子挙動を観察できるようにすることで、量子物理学の研究に革命をもたらした2。しかし、強力かつ複雑な方法で相互作用する物体にこの手法を一般化することは困難であり、多くの挙動がプラットフォームの範囲外のままであった。289ページで、Bigagliらは次のように述べている。

³ 報告
もう一つのボーズ＝アインシュタインの構想の実現
凝縮体 — 今回は極性分子の超低温ガス中。

極性分子は、分子が遠く離れていても互いに強く相互作用できるため、量子物理学者にとって特に興味深い。長距離相互作用は、固体中の電子から宇宙の物体まで、自然界のあらゆるところに見られるが、このような相互作用は極低温の気体では通常見られないため、科学者は長い間、このような系に導入しようとしてきた。電氣的に中性の粒子の場合、このような相互作用は通常、双極子間相互作用であり、粒子は小さな磁石のように振る舞い、隣り合うと反発し合い、頭と尾が向き合うと引き合う。原子系におけるこのような相互作用の設計は目覚ましい進歩を遂げてきた。しかし、このような相互作用は、原子間で起こる場合は弱いが、

励起原子によって誘導されたとき、それらは最低エネルギー状態、つまり短寿命であり、これにより模倣できる動作の範囲が制限されます4,5。

もう一つのアプローチは、2つの化学元素を含む分子から作られた超低温ガスを使用することです。これらの分子は分子結合全体にわたって電荷が不均一に分布しているため極性があり、これにより他の分子の双極子と相互作用する電気双極子が発生します5。

このような分子の超低温サンプルは、2つの原子種を含む超低温ガス中の原子をベアにするか、分子を直接冷却することによって、世界中の研究室で作成されています。これらのシステムは、最低エネルギー状態の原子を含むシステムよりもはるかに強い双極子相互作用を持ちます。また、分子の内部回転や振動などから生じるより多様な動作を示します。しかし、

この豊かさ、
制御が困難であるため、極性分子から作られたボーズ・アインシュタイン凝縮体の探索は20年以上も成功していない。

安定した分子集合体を形成して冷却する上での大きな障害は、分子同士の衝突によって、分子を捕らえているトラップ（通常は光で作られる）から分子が離れてしまうことである。これは、分子が

衝突すると互いにくっついて、個々の分子よりも脆弱な2分子複合体を形成します（図1a）。たとえば、3番目の分子と衝突すると、トラップから簡単に押し出されます6。

過去数年間、科学者たちは衝突法と呼ばれる技術を通じてこれらの分子損失を抑制することに成功してきた。

アーカイブから

人工採光は商業的な関心を得られず、基礎科学が英仏海峡トンネル建設の入札を後押しする。

100年前

おそらく、商業企業が人工採光や照明全般の改善に関心を示さなかったことについてコメントする人もいるだろう。1920年にはアメリカで15,000個の完全補正人工採光ランプが使用されており、需要は急速に伸びていた。イギリスでは、その10分の1も使用されていないのではないかとと思われる。

アメリカの需要は達成された。悪天候時にこのようなランプを使用することで得られる時間の節約は非常に大きいため、この無関心は異常に思える。そして、この状況が早く改善されればされるほど、これらの産業にとって良いことになる。

この主題は重要です。
ネイチャー誌より1924年7月12日

150年前

科学的研究は、明確に定義された「実用的な」目的を念頭に置いていない限り、何の役にも立たないということを、いまだに多くの人が理解できないのではないかと懸念しています。… 懐疑論者にとって、有用な技術の基礎として徹底した科学研究がいかにも不可欠であることを示す例として、ミスター・マクグリ氏が行った海峡の地質調査の結果以上に良い例はないでしょう。

プレストウィッチ氏は、昨年12月に土木技術者協会に発表しました。この海峡の下にある地層に関する研究は、物理的事実に関する綿密で慎重な推論のほぼ完璧な例であるように思われますが、現在、イギリスとフランスの間にトンネルを建設する計画者に、彼らが作業しなければならぬ材料の性質について啓蒙するために提出されています。プレストウィッチ氏の計画は、ロンドン粘土から古生代層に至るまで、海峡の下にあるすべての地層について慎重に議論することです。

ミスターのような慎重な論者なので、
プレストウィッチ氏は地質学的観点からこの計画を実行することは可能だと考えているが、もしこの事業が利益をもたらすことが証明されれば、わが国の技術者たちは、自分たちの技術の資源がその成功に十分見合うものであることを示そうとするだろう。

ネイチャー誌より1874年7月9日



ニュースと見解

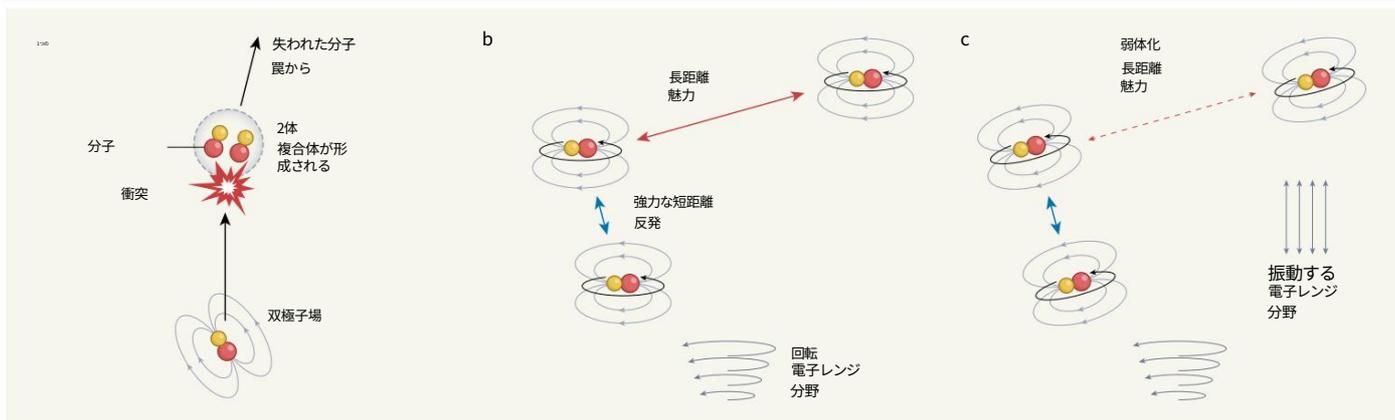


図1 | 極性分子の極低温ガスにおける損失の抑制。物理学者は長い間、極性分子のガス中にポーズ・アインシュタイン凝縮と呼ばれる量子状態を形成させようとしてきた。極性分子は電荷分布を持ち、その「双極子」場を通じて相互作用する。a、分子は通常レーザー光でトラップされるが、2体複合体を形成することができ、例えば3番目の分子と衝突することでトラップから失われる。b、回転するマイクロ波場は双極子を回転させ、これらの複合体の形成を防ぐ。

相互作用を修正して、短距離で強い反発力が生じるようにします。しかし、長距離での引力は残り、これが三体再結合と呼ばれるプロセスを通じて損失を引き起こします (図示せず)。c、Bigagliら、2番目の (振動する) マイクロ波場を導入しました。これにより、長距離引力が弱まることで三体損失が防止され、同時に全体的な相互作用の強度が低減します (図示せず)。これにより、著者らは極性分子のガス中に最初のポーズ・アインシュタイン凝縮を形成できるようになりました。

シールドは、分子が複合体を形成するのに十分接近するのを防ぎます⁷。シールドでは、分子間の双極子相互作用を操作して、分子が互いに近づきすぎないようにするために必要なエネルギーが法外に高くなるようにします。このアプローチは、最初に静電場を使用して分子の双極子を方向付け、分子が双極子軸に沿って相互作用するのを防ぎ、双極子引力を抑制するトラップを使用して実行されました⁸。2018年以降、回転するマイクロ波場を含む別のスキームが提案され⁹、実装されています^{10,11}。マイクロ波場は分子の内部状態に作用し、分子が接近すると互いに反発します (図1b)。

しかし、マイクロ波場は2つあり、1つは回転するもの、もう1つは振動するもの (図1c)。この2つの場の方式により、著者らは長距離引力を弱めることによって、2分子複合体の形成から生じる損失と3体再結合から生じる損失を抑制することができました²。2つの場の遮蔽条件下では、極低温分子は依然として相互に作用しますが、その強さは弱まります。

その結果、接触相互作用として知られる等方性 (方向に依存しない) 反発相互作用が異方性 (方向に依存する) 双極子相互作用と同様の強さを持つ、相互作用が弱いガスが生成され、従来のポーズ・アインシュタイン凝縮体を形成するのに好ましい条件が生まれます。

著者らは、超低温のナトリウム (Na) 原子とセシウム (Cs) 原子を結合させて30,000個のNaCs分子のガスを形成することから始めた。

「ポーズを求めて極性分子から作られるアインシュタイン凝縮は20年以上も成功していない。」

分子には内部励起がなく、彼らは、振動や回転などの振動をマイクロ波で発生させ、蒸発冷却と呼ばれる技術を使ってポーズ・アインシュタイン凝縮状態を作り出しました。

6ナノケルビンの温度で200分子を含み、典型的な密度は1立方センチメートルあたり1012分子、寿命は数秒です。サイズと密度は、

凝縮体の密度は、1立方センチメートルあたり1014原子の密度で数十万個の粒子を含む原子1,2,4と比較すると中程度でした。しかし、

ガスパラメータは、分子ガスの密度が低いにもかかわらず、分子系と原子系の相互作用の強さは類似していることを示しています。

ビガグリと同僚たちの成果は、数十年にわたる努力の成果として素晴らしいものですが、これはさらなる努力の始まりにすぎません。現在の重要な課題は、システム内の分子が互いに強く相互作用するようにすることです。これにより、たとえば、新しい物質状態を作り出す可能性が開かれます。

、あるいは、これまでアクセスできなかった量子挙動をシミュレートすることも可能だ。相互作用の強さ自体は遮蔽を変更することで簡単に調整できるが、このように強く相互作用するシステムの安定性はまだわかっていない。著者らのアプローチがこのような課題に対応するためにどのように適応、改善されるかを見るのは楽しみです。

Lauriane Chomazは、ドイツのハイデルベルク、69120 ハイデルベルクにあるハイデルベルク大学物理学研究所に所属しています。電子メール: chomaz@uni-heidelberg.de

これらの遮蔽戦略により、物理学者はフェルミオンと呼ばれる粒子からなるシステムにおいて集団量子状態を実現することができました。フェルミオンは量子力学の原理 (パウリの排他原理) によって、同じ量子状態を同時に占めることができません^{8,11}。しかし、ポーズ

アインシュタイン凝縮は、多数の粒子が単一の量子状態を占めるときに発生しますが、これはボソンと呼ばれる粒子で構成されたシステムでのみ発生します。残念ながら、量子状態を複数占めるというこの特性により、ボソンはフェルミオンよりも損失を受けやすくなります。

このため、極性分子のシステムではポーズ・アインシュタイン凝縮を実現することが困難であり、マイクロ波シールドが長距離引力の結果として生じる三体再結合と呼ばれるプロセスを通じて損失を誘発するという事実によって困難さはさらに悪化している。

Bigagliらは、マイクロ波遮蔽戦略を改良し、1つではなく2つの極性分子ポーズ・アインシュタイン凝縮体を実現することで、この問題を克服した。

1. Ketterle, W. *Physics Today* 52, 30-35 (1999)。
2. Bloch, I., Dalibard, J. & Zwerger, W. *Rev. Mod. Phys.* 80, 885 (2008)。
3. Bigagli, N. et al. *Nature* 631, 289-293 (2024)。
4. Chomaz, L. et al. *Phys. Rev. Lett.* 129, 053001 (2023)。
5. Browaeys, A. & Lahaye, T. *Nature Phys.* 16, 132-142 (2020)。
6. Bohn, J. L., Ley, J. M., & E. J. *Science* 357, 1002-1010 (2017)。
7. Langen, T., Valtolina, G., Wang, D. & Ye, J. *Nature Phys.* 20, 702-712 (2024)。
8. Valtolina, G. et al. *Nature* 588, 239-243 (2020)。
9. Carlman, T. & Hattson, J. *Physics Review Letters* 121, 163401 (2018)。
10. Anderreg, L. et al. *Science* 373, 779-782 (2021)。
11. Schindewolf, A. et al. *Nature* 607, 677-681 (2022)。

著者は利益相反がないことを宣言します。