

理工学部物理学科／量子光学研究室
量子力学、レーザー冷却、近接場光学

東條 賢准教授

【プロフィール】 東條賢(とうじょうさとし)▷1972年、大阪府生まれ。1997年、京都芸繊維大学工学部機械システム工学科卒業。1997～99年、京都大学大学院工学研究科機械物理学専攻修士課程修了。1999～2000年、富士通株式会社光ネットワーク事業部勤務。2000～03年、京都大学大学院工学研究科機械物理学専攻博士後期課程修了、学位取得。2003～04年、京都大学国際融合創造センター産学官連携研究員。2004～06年、京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻博士研究員。2006～12年、学習院大学理学部助手、2007年、同大学助教。2012年より中央大学理工学部准教授。



レーザーで原子を冷却し、さらに室温の10億分の1まで冷やす。そのとき、波のようにふるまいたす原子の姿に、新たな発見を見出す。

「レーザー冷却」という言葉を知っていますか？例えば「レーザー治療」には“焼く”イメージがあるので、レーザーと冷却はすぐに結びつかないかもしれません。実は東條先生も「レーザーでなぜ冷たくなるの？」という疑問から、この分野に興味を持ったそうです。しかし、その疑問にこそ物理ならではの面白さがつまっているのです。冷却温度は、究極的には100 nK（室温（300K）の約10億分の1）。しかもそのとき、冷却された原子は波のようにふるまい始めるのです。最近、ノーベル賞でも話題の注目の領域で、皆さんも新たな発見を手にすることができるかもしれません。

真っ直ぐに強く進むレーザーという光

「レーザー冷却」について知る前に、そもそも「レーザーとは何なのか」という説明から東條先生にお願いしました。

「私たちの身の回りの光は波長がバラバラで、元のエネルギーは同じでもすぐ広がってしまうのですが、波長と位相が揃ったレーザーの光は、真っ直ぐに進む指向性を持っているので、エネルギーをそのまま強く伝えられます。ブランコをこぐとき、タイミングが合わない力が分散して上手にこげませんね。でも位相が合いタイミングが合うとしっかり力が伝わって振り幅も大きく強くこげます。これと似た関係と言えます」

さらにレーザー冷却には、単一の波長を持つレーザーが使われます。「光学部品や電気回路などを使った装置を実験室で作り、波長の精度を高めていきます」

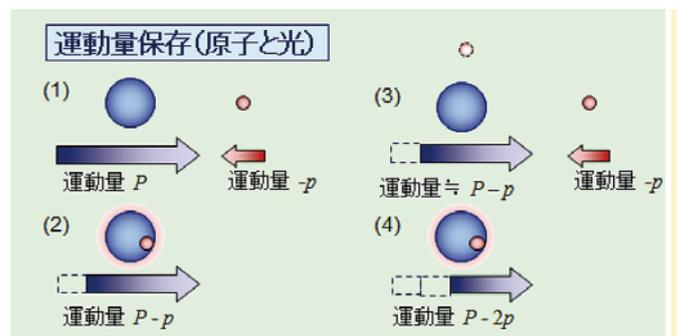
コンサートのステージでも使われる強い光もレーザーですが、次は、その光が原子を冷却するメカニズムに迫ります。

レーザー冷却の秘密は「運動量保存の法則」に

レーザーで冷却する際の温度の単位は「K=ケルビン」、つまり絶対温度。日常生活で使われる「摂氏」は経験則から生まれた基準で、物理の法則から生まれたKは現象をより正確かつシンプルに捉えられるそうです。レーザー冷却では、原子を100万分の1K（ 10^{-6} ）まで冷やすことができます。

「レーザー冷却のメカニズムは、高校の理科で学んだ内容で全

て説明がつかます。粒子の速度が速ければ温度が高く、遅ければ温度が低くなりますね。したがって原子の速度を落とせば冷やすことができるわけです。『外力を無視できるとき、系の運動量の和は保存される』という『運動量保存の法則』は皆さんも学んだはずです。例えば、動いている船の前方からどんどん飛んでくるボールを受け続けると船の運動量（速度）が減少するのこの法則ですが、この関係がレーザー光を原子にぶつけ続ける場合にも起きると考えてください」



▲動いている原子が前方からどんどん飛んでくる光子を吸収するときも原子と光子の運動量保存の法則が成立し、光子を受け続けることで原子の運動量（速度）が減少し、低速度つまり低温度になります。

原子が波のようにふるまいたす現象

このレーザー冷却を使って東條先生は、冷やされると波のような動きを始める原子の性質を研究しています。

「室温で酸素や窒素は100 m / 秒進みますが、レーザー冷却

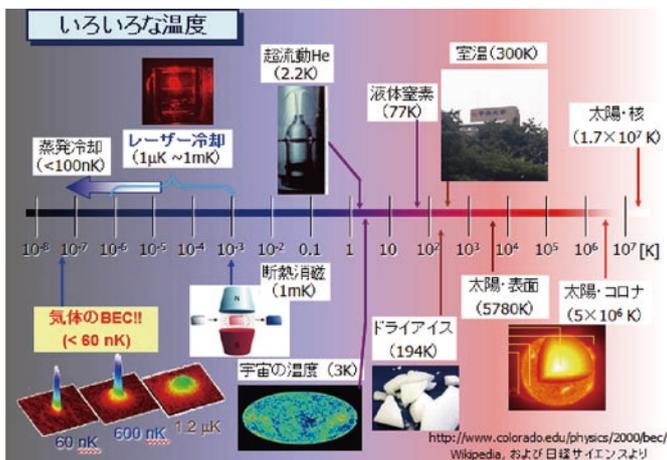
で極限まで冷やした場合、1mm/秒まで速度が落ち、これまで観察できなかった領域が観察しやすくなります。

研究では、さらに蒸発冷却など複数の冷却技術を使ってアルカリ原子を100 nK= 10^{-7} K)まで冷却します。この温度は、絶対零度(絶対温度における零度)から1千万分の1度だけ高い値です]

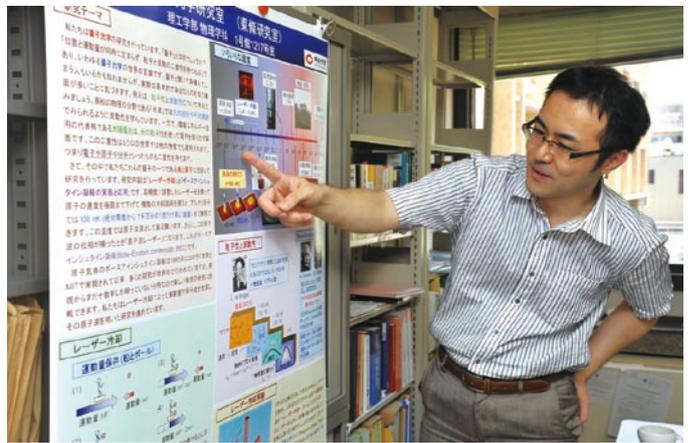
この100 nKに達したとき、原子の波のようなふるまいが支配するということです。

「原子は粒子だと思っている方が多いかもしれませんが、実は粒子と波の両方の性質も持っていて、冷やすと波の波長がどんどん広がっていくのです。最初は波長も位相もバラバラな状態なのですが、隣同士の原子の波束が重なって波長と位相が全て揃った状態になります。これが『ボースアインシュタイン凝縮』です」

「ボースアインシュタイン凝縮」は、1925年、インドの物理学者S.N. ボースの手紙をきっかけにA. アインシュタインがその存在を予言したのですが、1995年、アメリカの科学者、C.E. ワイマンとE.A. コーネルがその実現に成功。この2名を含め、レーザー冷却とボースアインシュタイン凝縮の分野で最近10年間に10名近くノーベル物理学賞受賞者が出ている、ホットな研究分野なのです。



▲様々な温度を比較したチャートです。高温の方は地上での実現が難しいですが、低温の方はまだまだ可能性が広がります。「BEC」は「ボース・アインシュタイン凝縮」を示します。



を扱います。それは、ボースアインシュタイン凝縮を作れる原子種の1つだからです。そこから近接場も視野に新たな研究分野にチャレンジできます。それでは具体的に原子を調べる方法はどのようなのでしょうか。

「原子は光を吸収すると影になるので場所が分かり、波長の変化でエネルギーが分かります。また、温度が高いと動く速度が速くなるため、広がり方で温度も分かります。

『何だろう、この現象は、この振動は。何かおかしい、何か不思議だ』。そんなドキドキワクワクが実験にはたくさんあります。たいていは失敗の方が多いのですが、なぜその現象が起きたのかをつき詰めていくと、自分がどこが分からなかったかが分かります。そしてそれも自分にとっては発見で、やはりドキドキワクワクするんですよ」

そのように研究の魅力を語る東條先生に、ノーベル物理学賞を輩出しているこの分野において「ノーベル賞に挑む課題とは？」という質問をぶつけてみました。

「既に明らかになった原理だけでなく、誰も見つけていない原理を技術として使って新しい世界を切り拓く必要があります。でも、いまここで予想できるものではなく、後になってからその課題がわかってくるのだと思います」

物理学界注目の分野で、次の大発見のために自分のアイデアを試してみる価値は十分にあるでしょう。

「実験を繰り返すことで、何かが分かってくるはず」

そんな東條先生のもので、物理学の楽しさに出合ってください。

実験は成功でも失敗でも ドキドキワクワクの連続

いま冷却された原子については、基本的なデータが蓄積されてきた状況であるそうで、次なる方向性は多岐に渡っています。東條先生も他大学との共同研究も含め、様々なアプローチを開始しているところです。その中の一つに「近接場光学」という先生のもう一つの専門があります。

「例えば赤だったら700ナノメートルという波長が光にはあり、物質を測るものさしになっています。つまり波長以下の物は通常見えません。『近接場光学』ではその光の波長より小さなナノサイエンスの領域です。自由な場所では見えなくても、表面の近くで近接場”では、光と物質が結合して初めて出て来る状況が生まれ、光の波長より小さな物質が見えてくることがあります。そこで、レーザー冷却の分野にこの近接場の効果を取り入れることも考えています」

このように熱い東條先生の研究室では、ルビジウムという原子

Message ~受験生に向けて~

勉強でも研究でも、疑問に思うことや不思議に思うことはとても大事です。教科書に書かれたことから、先生の言うことだから、こうなんだと思いつくのではなく、なぜそうなるのか、一体これは何だろうと考えることが大切なのです。たとえすぐに正解にたどり着けなくても、自分たちの力で問題に取り組むことこそ貴重な経験になるでしょう。そして、それを積み重ねていけば、いつの間にか新しい発見につながることもきっとあるはずですよ。