

Q. レーザー冷却ってなに？

A. レーザー光を使って物質を冷却する技術です。以下のような特徴があります。

- 冷やす対象: (主に) **原子の気体**
- 冷やせる温度: **0.0001 K**以下 (*)
- 冷やせる量: 超微量(原子 10^{10} = 100億個程度まで)

cf.  = アルミニウム原子約 2×10^{22} 個
(2の後ろにゼロが22個)

* K (ケルビン): 絶対温度の単位
絶対零度を0 Kとして温度を測る (0 K = -273.15 °Cとする)

元素の周期表

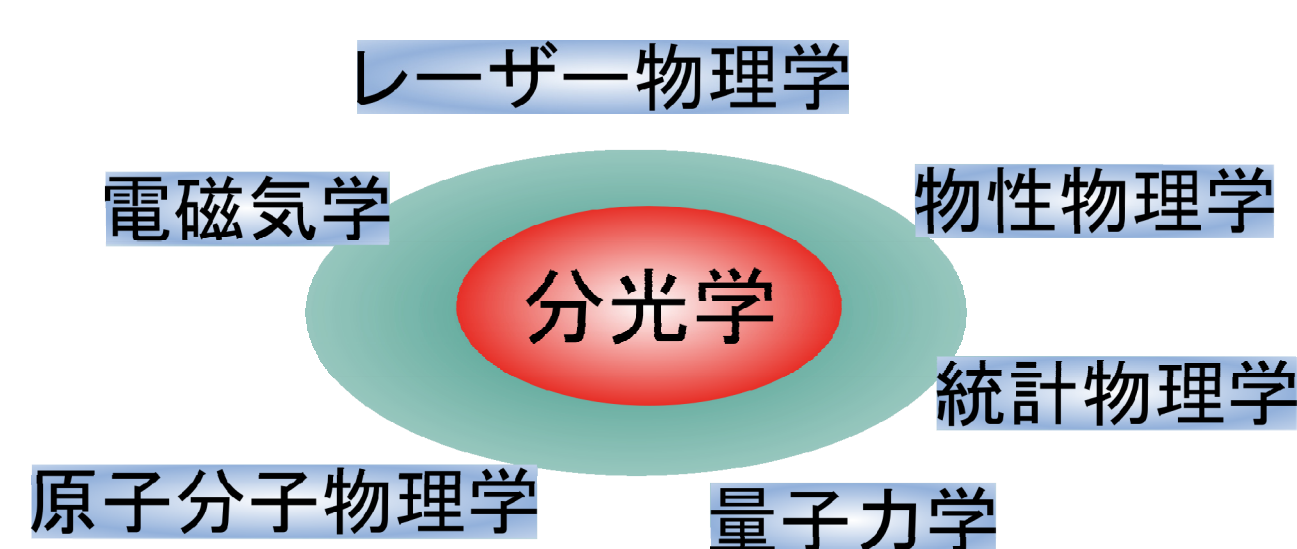
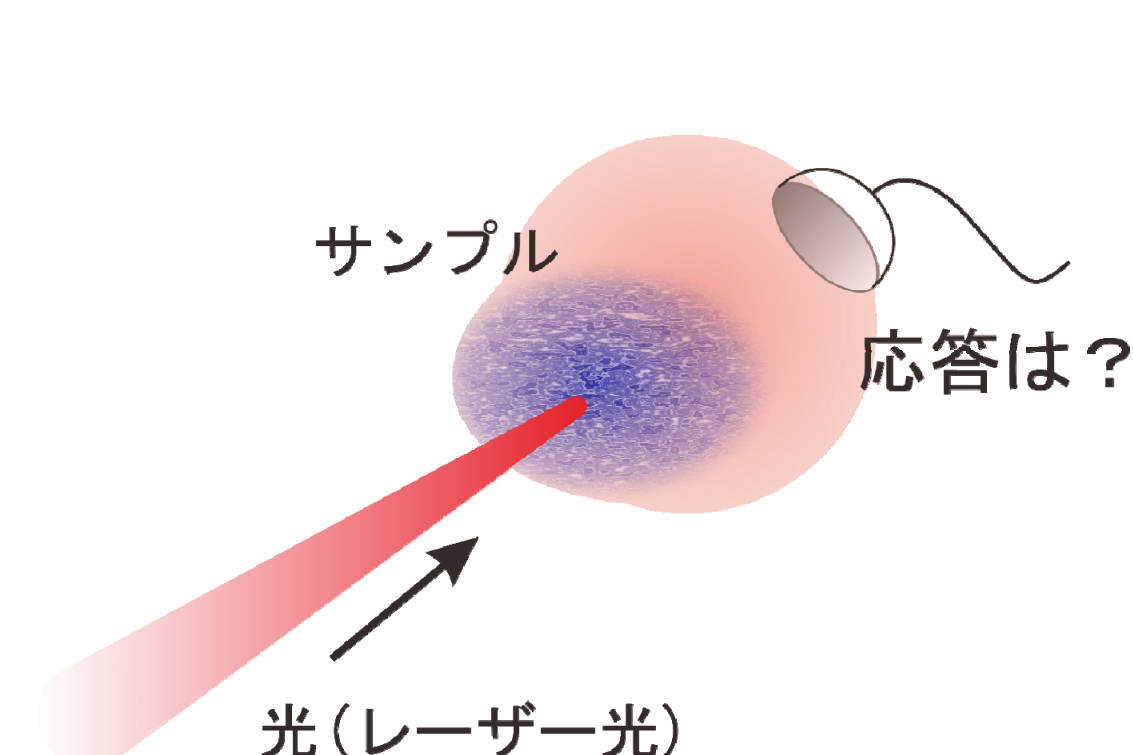
原子番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素 1.00794																	2 He ヘリウム 4.00260
2	3 Li リチウム 6.941	4 Be ベリリウム 9.01218											5 B 硼素 10.811	6 C 炭素 12.0108	7 N 窒素 14.0064	8 O 酸素 15.9994	9 F 弗素 18.9984	10 Ne ネオン 20.1797
3	11 Na ナトリウム 22.98976928	12 Mg マグネシウム 24.304											13 Al アルミニウム 26.9815386	14 Si 珪素 28.0855	15 P 燐素 30.973762	16 S 硫黄 32.06	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.948
4	19 K カリウム 39.0983	20 Ca カルシウム 40.078	21 Sc スカンジウム 44.955912	22 Ti チタン 47.867	23 V バナジウム 50.9415	24 Cr クロム 51.9961	25 Mn マンガン 54.938	26 Fe 鉄 55.845	27 Co コバルト 58.9332	28 Ni ニッケル 58.6934	29 Cu 銅 63.546	30 Zn 亜鉛 65.38	31 Ga ガリウム 69.723	32 Ge ゲルマニウム 72.630	33 As 砒素 74.9216	34 Se セレン 78.9718	35 Br 臭素 79.904	36 Kr クリプトン 83.796
5	37 Rb ルビウム 85.4678	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.90584	40 Zr ジルコニウム 91.224	41 Nb ニオブ 92.90638	42 Mo モリブデン 95.94	43 Tc テクネチウム [98]	44 Ru ルビジウム 101.07	45 Rh ロジウム 102.9055	46 Pd パラジウム 106.42	47 Ag 銀 107.8682	48 Cd カドミウム 112.411	49 In インジウム 114.818	50 Sn スズ 118.710	51 Sb アンチモン 121.757	52 Te テルル 127.60	53 I ヨウ素 126.905	54 Xe キセノン 131.29
6	55 Cs セシウム 132.90545	56 Ba バリウム 137.327	*1	58 Ce セリウム 140.90768	59 Pr プラセオジム 140.90768	60 Nd ネオジム 144.242	61 Pm プロメチウム [145]	62 Sm サマリウム 150.36	63 Eu ユウロピウム 151.964	64 Gd ガドリウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.925	66 Dy ジスプロシウム 162.500	67 Ho ホルミウム 164.93032	68 Er エルビウム 167.259	69 Tm テュリウム 168.93487	70 Yb イットリウム 173.045	71 Lu ルテチウム 174.967	
7	87 Fr フランシウム [223]	88 Ra ラザール [226]	*2	90 Th タリウム 232.0377	91 Pa アクチニウム 231.036888	92 U ウラン 238.02891	93 Np ネプツニウム [237]	94 Pu プルトニウム [244]	95 Am アメリシウム [243]	96 Cm カリホルニウム [247]	97 Bk バークリウム [247]	98 Cf カリフォルニウム [251]	99 Es エンスカイニウム [252]	100 Fm フェルミウム [257]	101 Md メンデルレーヴィウム [258]	102 No ノーボリウム [259]	103 Lr ローレンシウム [262]	
*1	57 La ランタン 138.90547	58 Ce セリウム 140.90768	59 Pr プラセオジム 140.90768	60 Nd ネオジム 144.242	61 Pm プロメチウム [145]	62 Sm サマリウム 150.36	63 Eu ユウロピウム 151.964	64 Gd ガドリウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.925	66 Dy ジスプロシウム 162.500	67 Ho ホルミウム 164.93032	68 Er エルビウム 167.259	69 Tm テュリウム 168.93487	70 Yb イットリウム 173.045	71 Lu ルテチウム 174.967			
*2	89 Ac アクチニウム [227]	90 Th タリウム 232.0377	91 Pa アクチニウム 231.036888	92 U ウラン 238.02891	93 Np ネプツニウム [237]	94 Pu プルトニウム [244]	95 Am アメリシウム [243]	96 Cm カリホルニウム [247]	97 Bk バークリウム [247]	98 Cf カリフォルニウム [251]	99 Es エンスカイニウム [252]	100 Fm フェルミウム [257]	101 Md メンデルレーヴィウム [258]	102 No ノーボリウム [259]	103 Lr ローレンシウム [262]			

 : レーザー冷却できる元素

(Wikipediaより抜粋)

Q. どんな研究分野なの？

A. 光(電磁波)を使って物質の性質を調べる**分光学(Spectroscopy)**と呼ばれる研究分野の1つです。

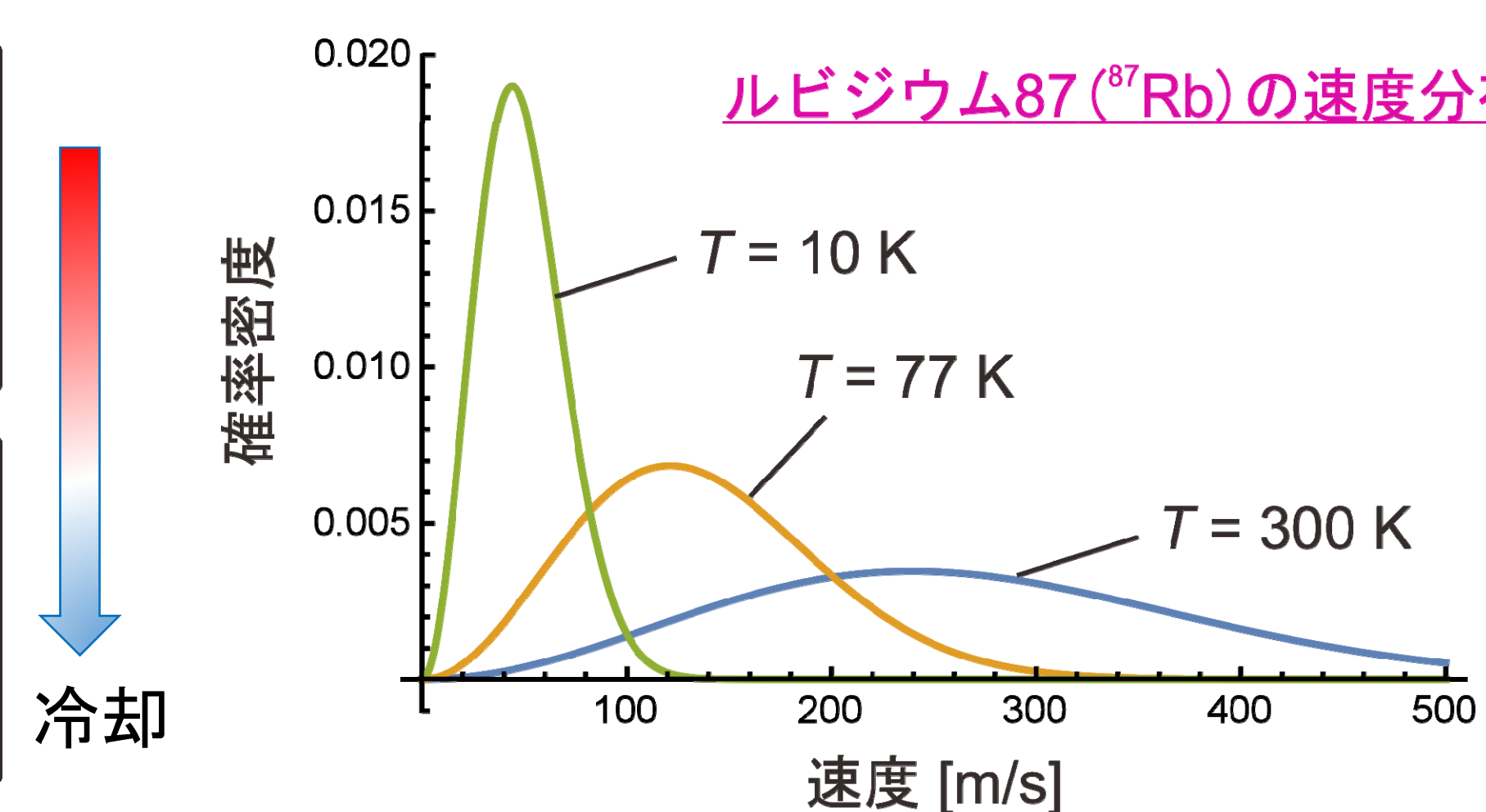
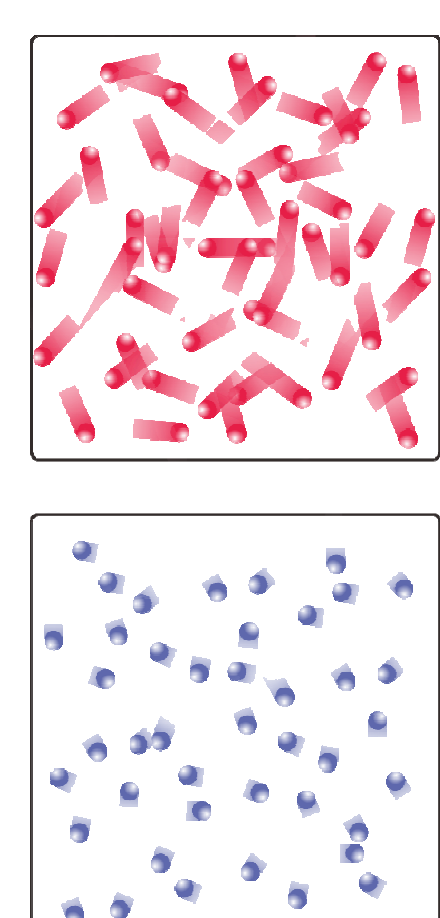


分野横断的な研究が多いので、幅広い知識と経験が必要です。

Q. 冷やすメリットは？

A. 物質(原子)の熱運動が減り、物質本来の性質が見えてきます。

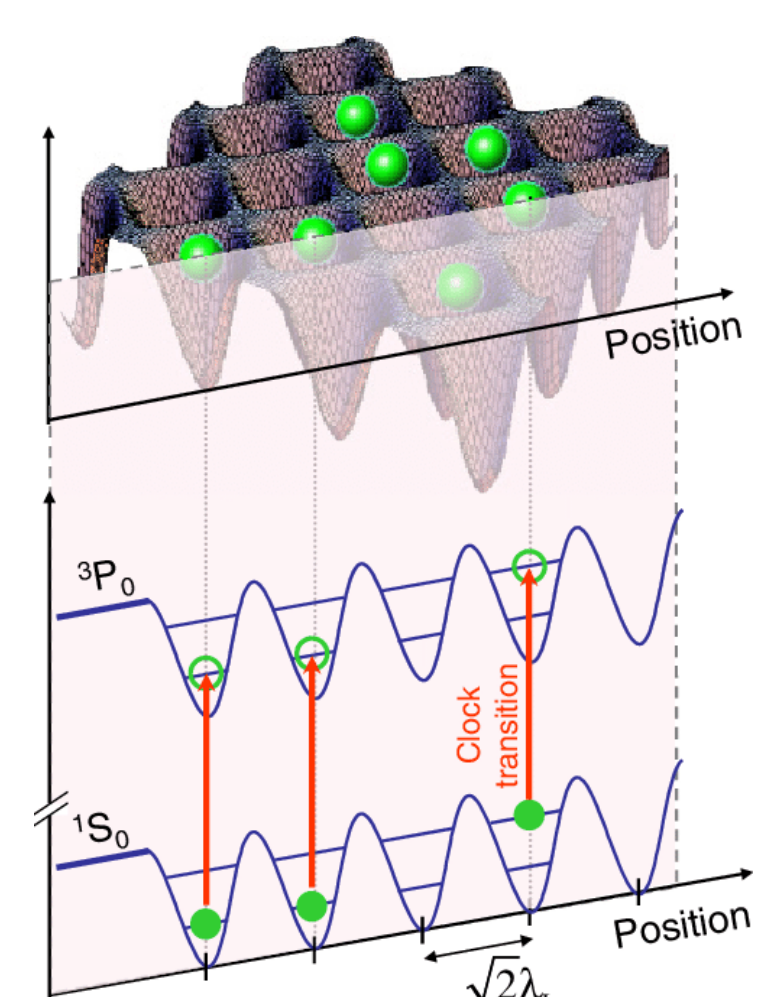
- ✓ **原子の内部構造**
エネルギー準位、スピンetc
- ✓ **原子の波動性**
「物質波」としての振る舞い



Q. どんなことに応用されるの？

A. 原子の**量子的性質**に注目した応用研究が特に盛んです。

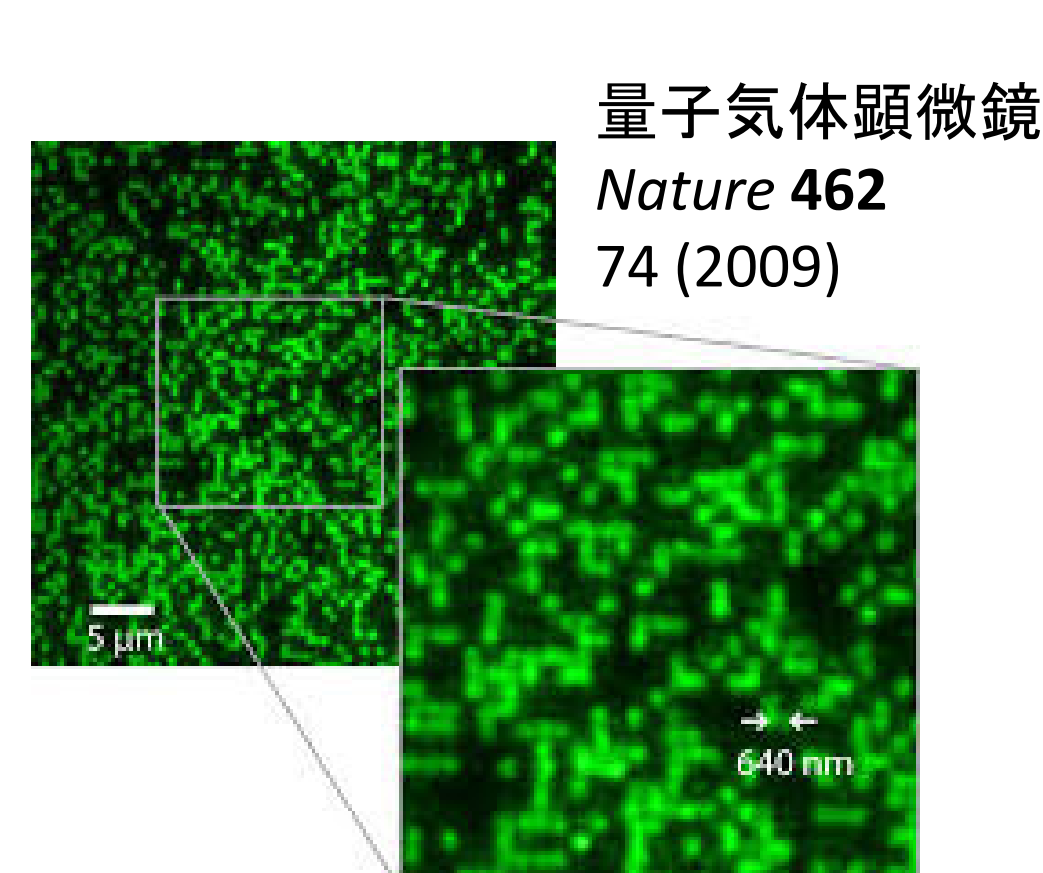
✓ 超精密時計



光格子時計
JJAP 49 080001 (2010)

誤差「3億年に1秒」

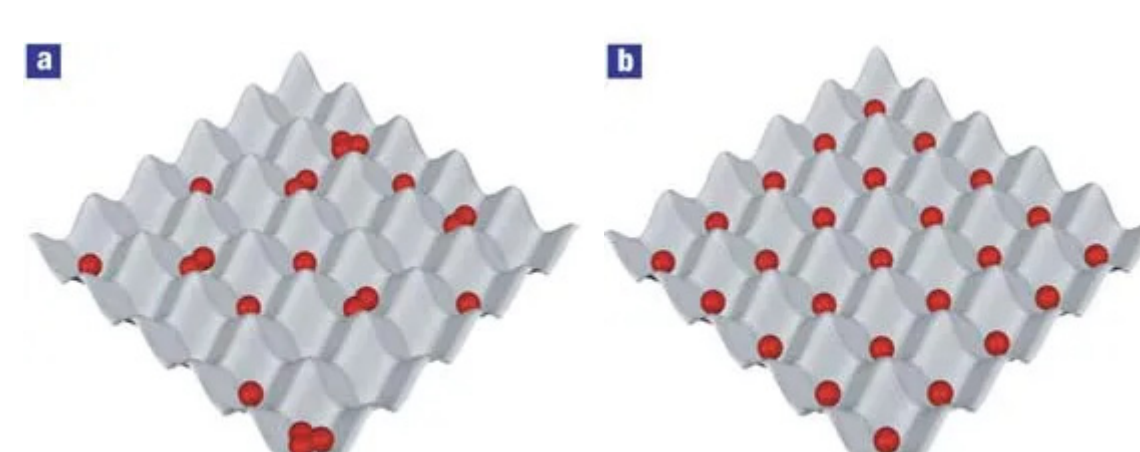
✓ 量子操作・制御



気体原子を1個1個
操作する

✓ 量子シミュレータ

「直接調べるのが難しい
量子現象を別の物質内
で再現する」



超流動-Mott絶縁体相転移
Nature Physics 1, 23 (2005)

液体窒素
-196 °C ≡ 77 K

液体ヘリウム4の沸点
-269 °C ≡ 4.2 K

レーザー冷却原子
0.0001 K以下

絶対零度
0 K

水の沸点
100 °C ≡ 373 K

水の融点
0 °C ≡ 273 K

高温超伝導
最高記録
-70 °C ≡ 203 K

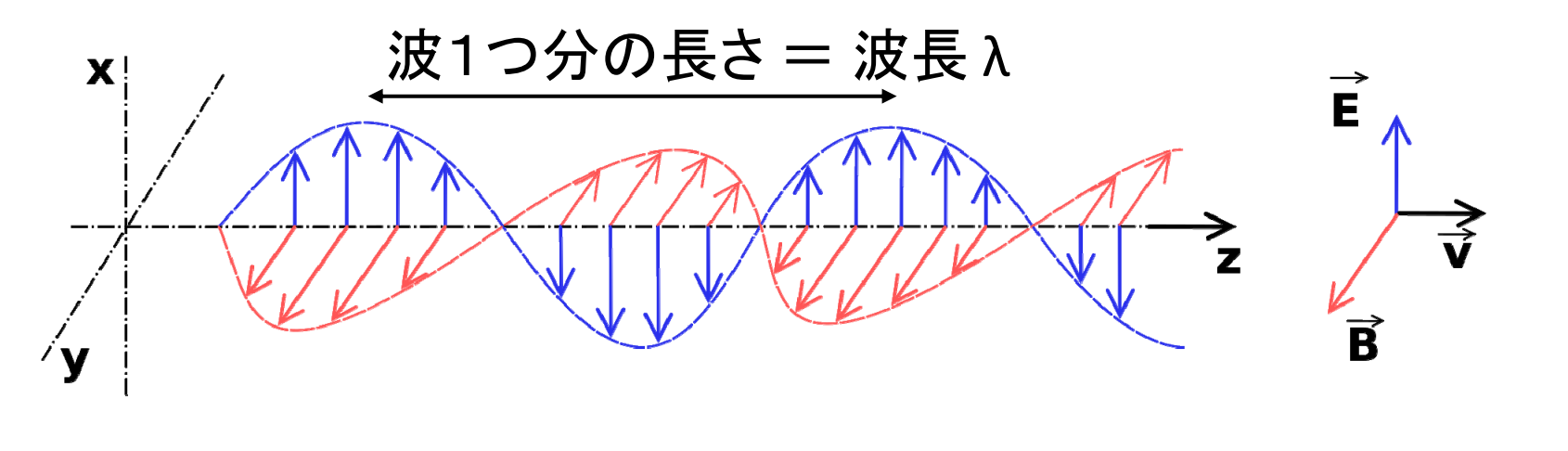
ドライアイス
-78 °C ≡ 195 K

室温

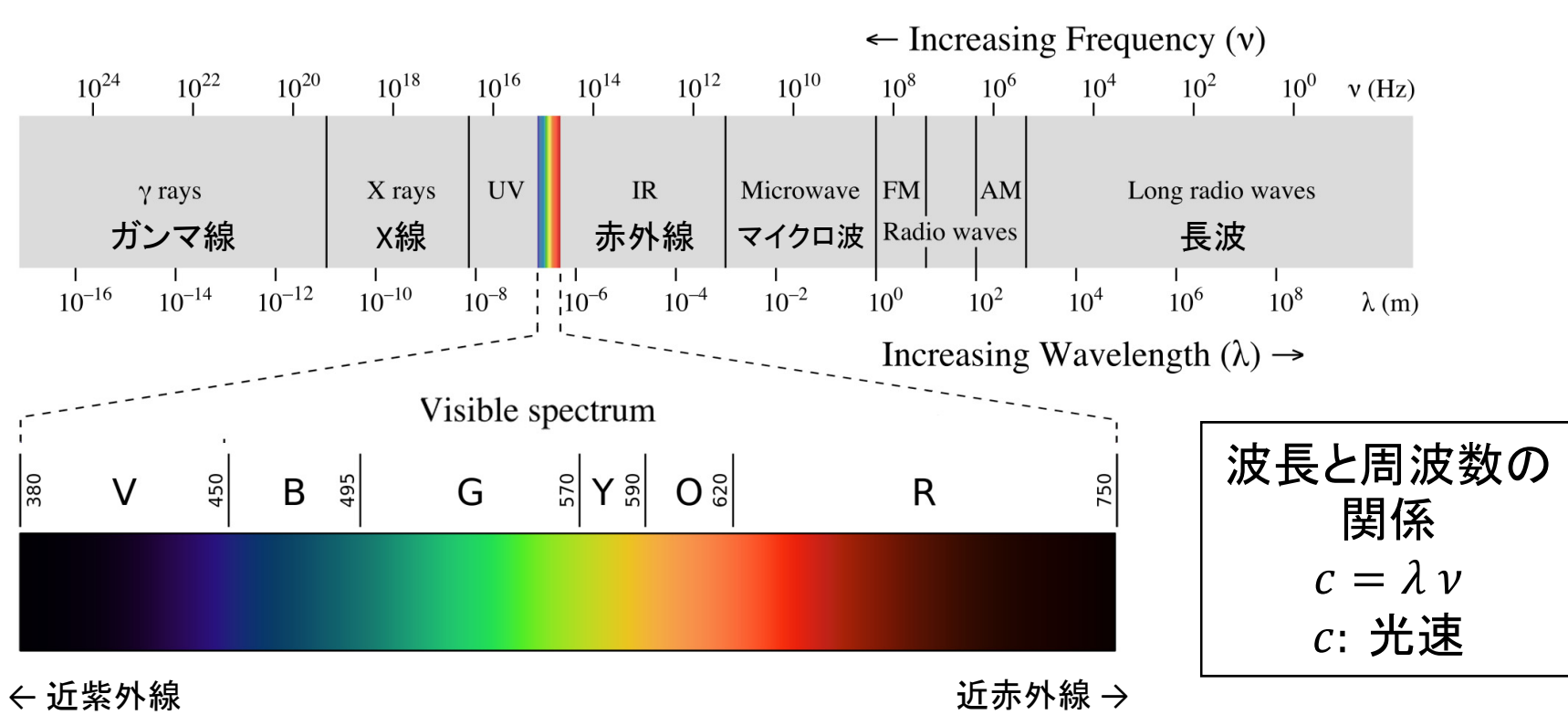
予備知識

光(電磁波)

電場と磁場のペアが空間中を波のように伝わって進む

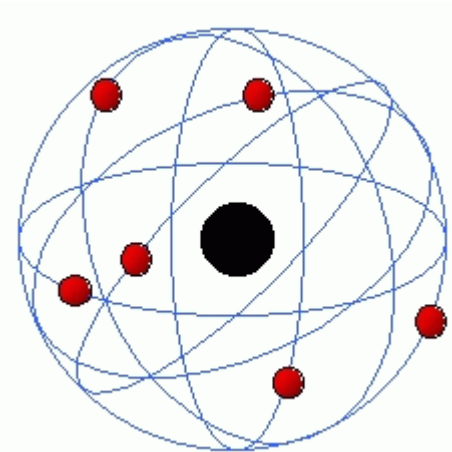


電磁波の分類



ある特定の波長の電磁波を「光」と呼ぶ

原子の構造



最も簡単なモデル:
ラザフォードの原子模型
原子核のまわりを電子が飛び回っている

エネルギー準位

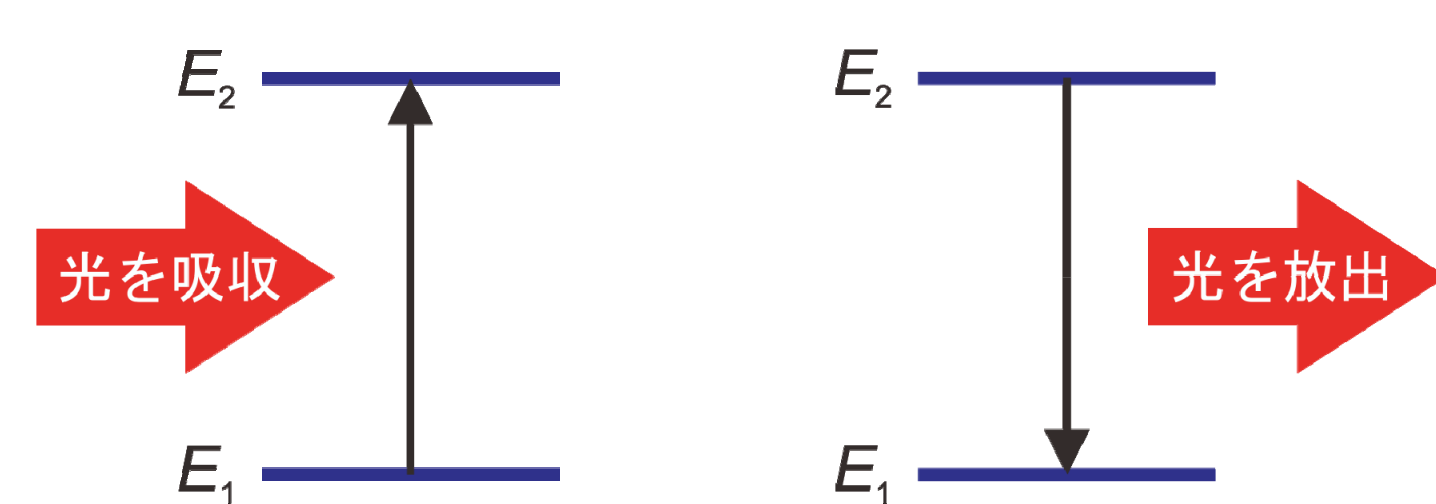
飛び回る電子の軌道は決まっている
→ 特定のエネルギーだけ持てる

Energy

Excited states
励起状態
Ground state
基底状態

光の吸収と放出

原子に光を当てると何が起るのか?



共鳴条件

$$E_2 - E_1 \equiv h\nu_a = h\nu$$

h : プランク定数

ν_a は原子によって違う

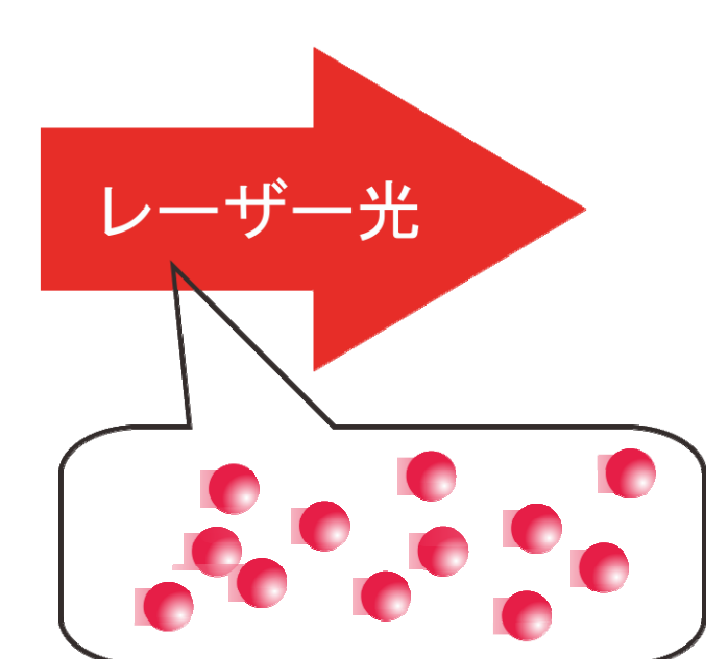
↓
原子は固有の共鳴波長
(共鳴周波数)を持つ



(図の一部はWikipediaより抜粋)

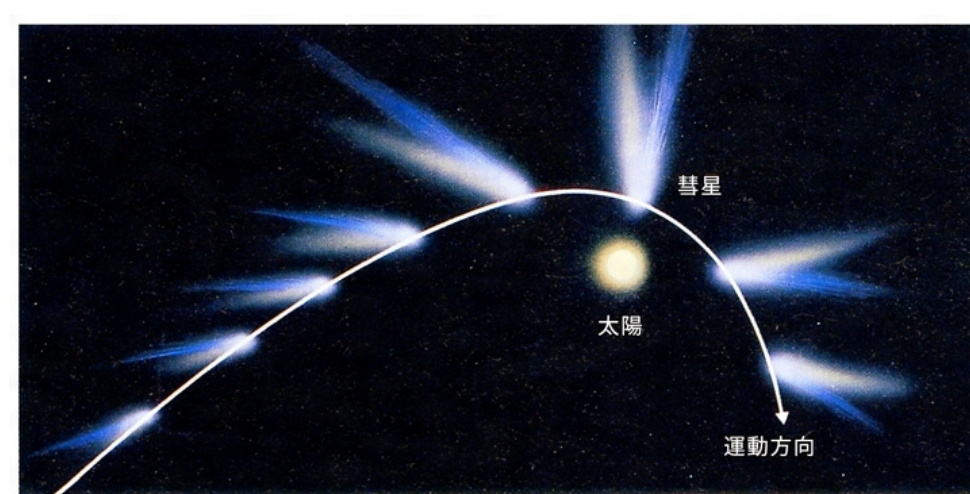
レーザー冷却の原理

光の粒子性



- ✓ 光は電磁場の「波」であると同時に「粒子」の集団でもある(波と粒子の両方の性質を持つ: 2重性)。
- ✓ 粒子のことを「光子(photon)」という。
- ✓ 光子1個はエネルギー $h\nu$ と進行方向の運動量 h/λ を持つ。

光子の運動量が観測できる例



出典: 小学館 日本大百科全書(ニッポニカ)

ドップラー冷却

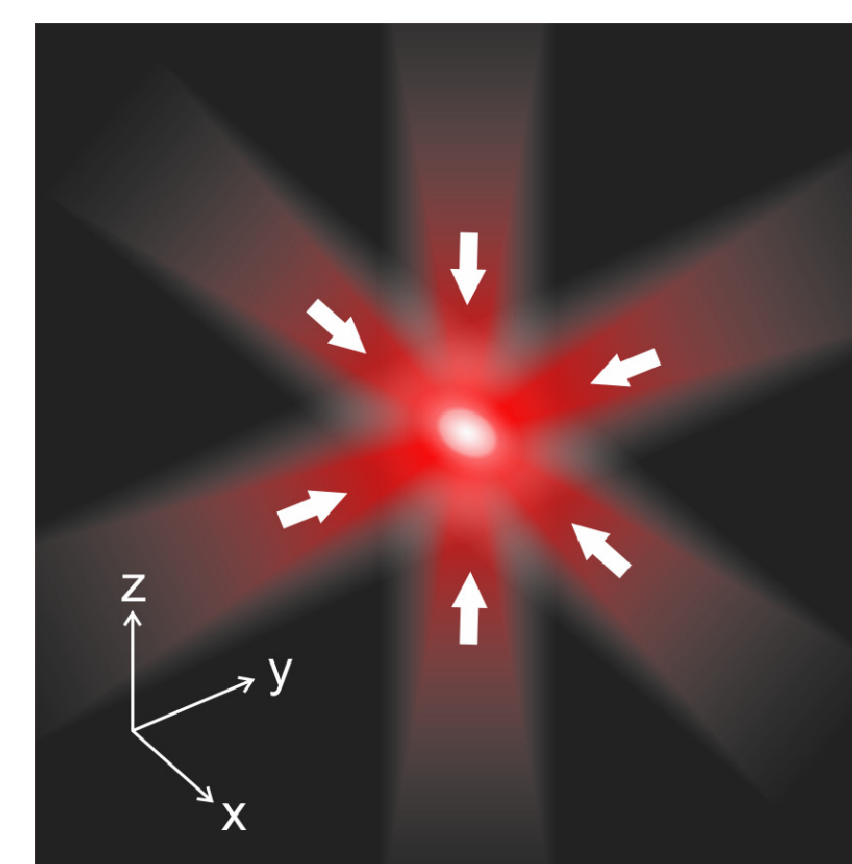
飛んでいる原子に対向して共鳴周波数より少し低い周波数のレーザー光を照射する(「負に離調している」という)。



ドップラー効果によって
原子は光の周波数を高く感じ、共鳴しやすくなる
→ 光子が吸収される

吸収(衝突)
レーザー光に含まれる光子
原子
光子の運動量で
原子が少し減速
 $\Delta v = h/(m\lambda)$

3次元6方向からレーザー光を照射
↓
原子の進行方向によらず減速できる。
光学糖蜜(Optical molasses)と呼ばれる。



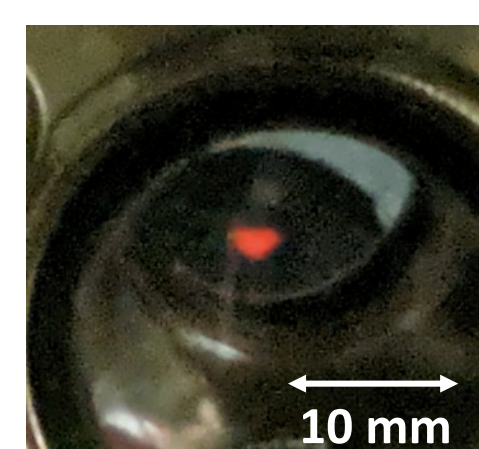
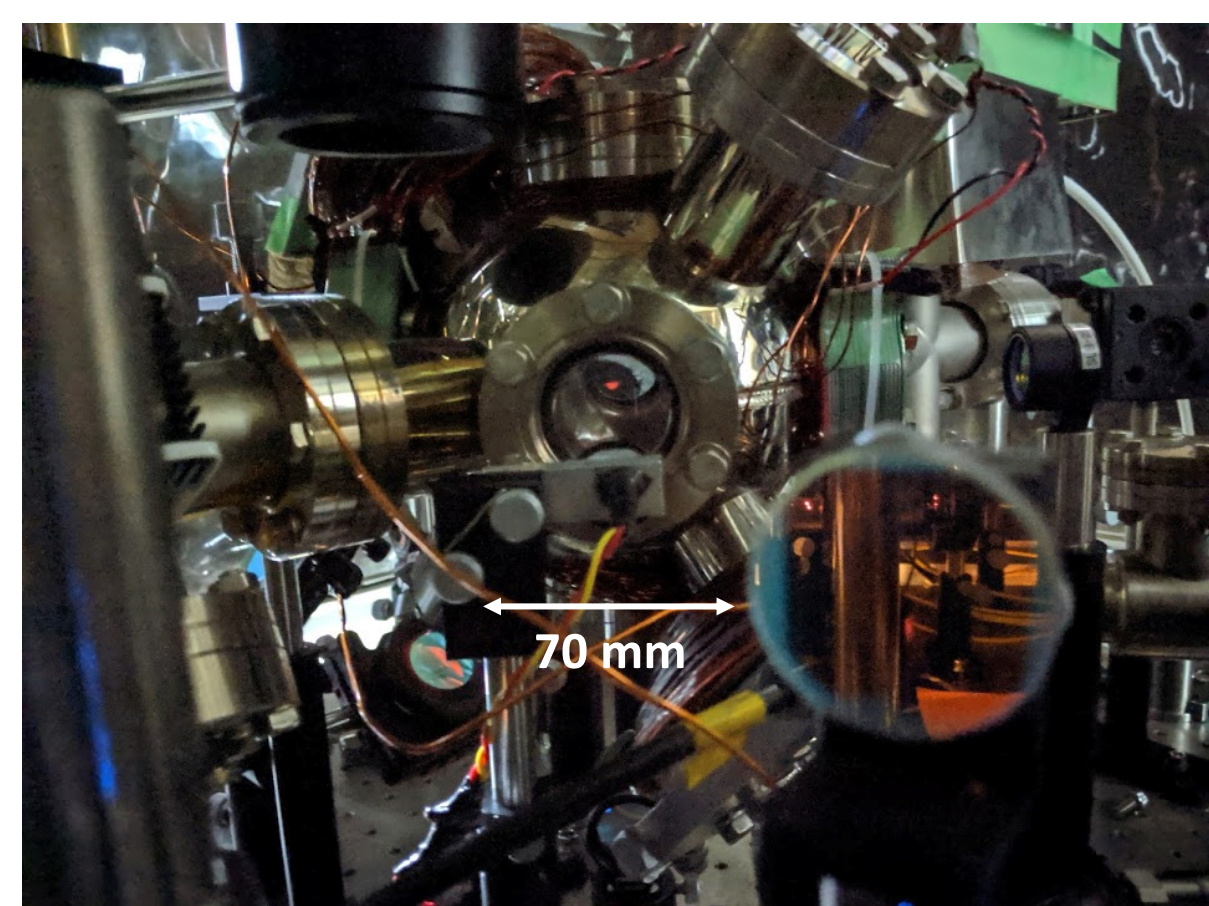
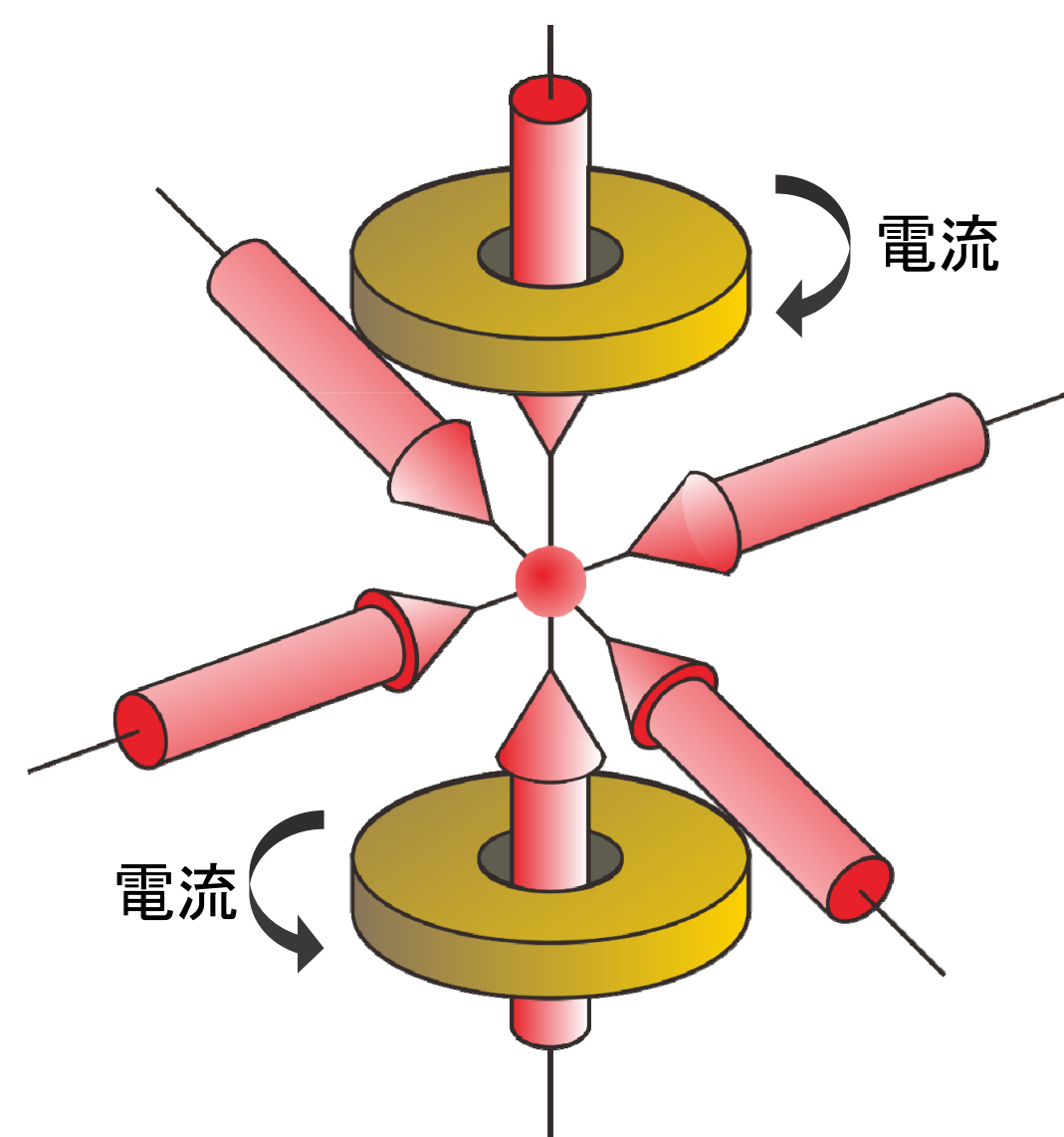
原子に加わる力 = 減速力

$$\vec{F} = -\alpha \vec{v}$$

冷却原子のトラップ技術

磁気光学トラップ

Magneto-Optical Trap: MOT
3次元光学糖蜜+磁場勾配



原子種	^{87}Rb
原子数	約 10^8 個
温度	約 $200\ \mu\text{K}$

原子に加わる力 = 減速力 + 束縛力

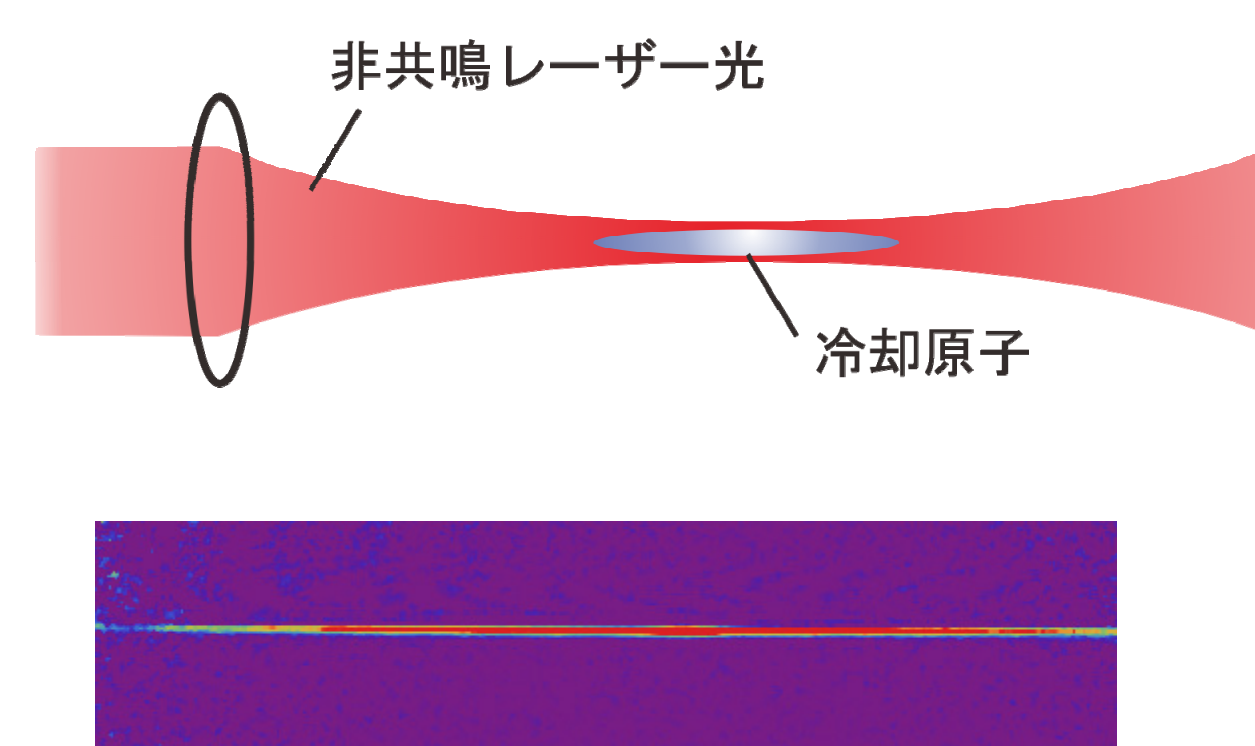
$$\vec{F} = -\alpha \vec{v} - \beta \vec{r}$$

レーザー冷却には温度限界がある
もっと冷やすには?

光双極子トラップ

Optical dipole-force trap
光子の吸収を伴わないトラップ方法

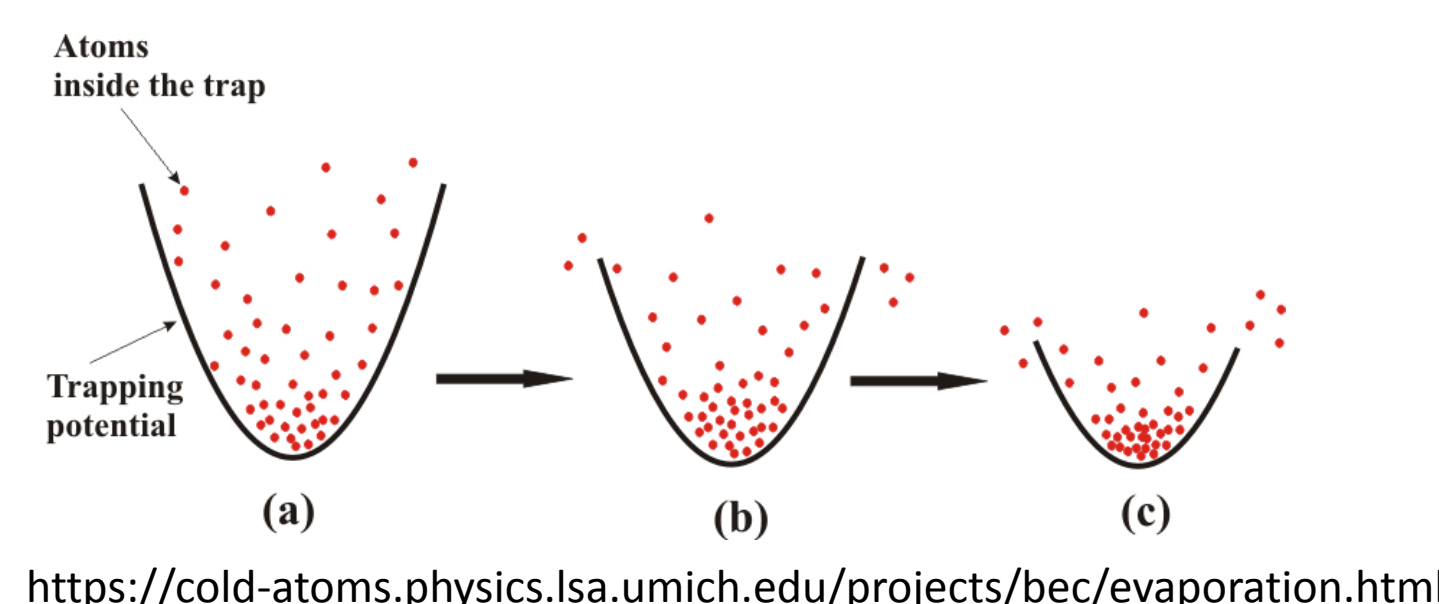
光双極子力:
光強度の強い(もしくは弱い)領域に物質が引き寄せられる



$N \sim 10^6, T \sim 200\ \mu\text{K}$
 N : 原子数
 T : 温度

蒸発冷却

原子集団の中で速度の速い原子を選択的に捨てる
→ 残りは冷える

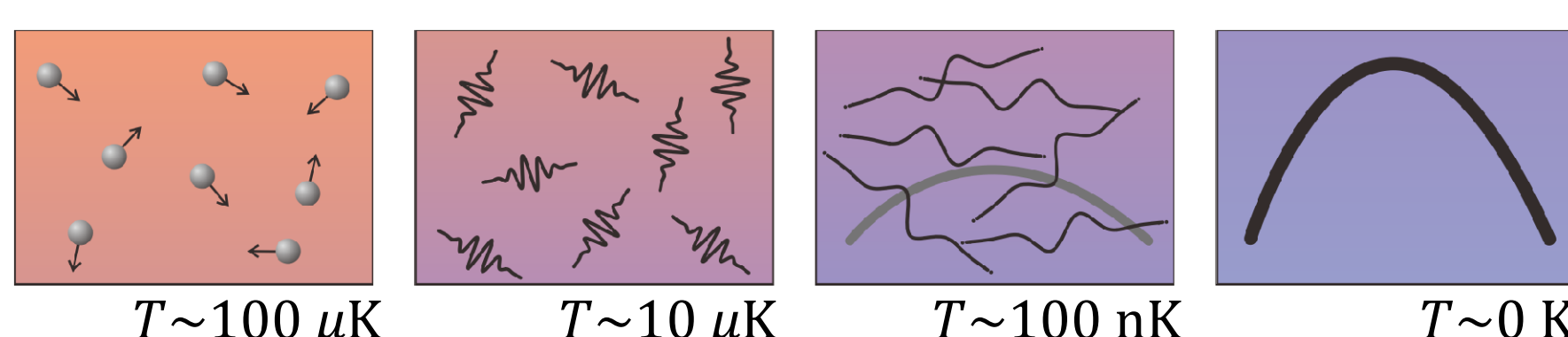


<https://cold-atoms.physics.lsa.umich.edu/projects/bec/evaporation.html>

$N \sim 10^6, T \sim 200\ \mu\text{K}$
 $N \sim 10^5, T \sim 2\ \mu\text{K}$
 $N \sim 10^4, T \sim 200\ \text{nK}$

ボース・アインシュタイン凝縮

極限まで冷やした先にある量子の世界

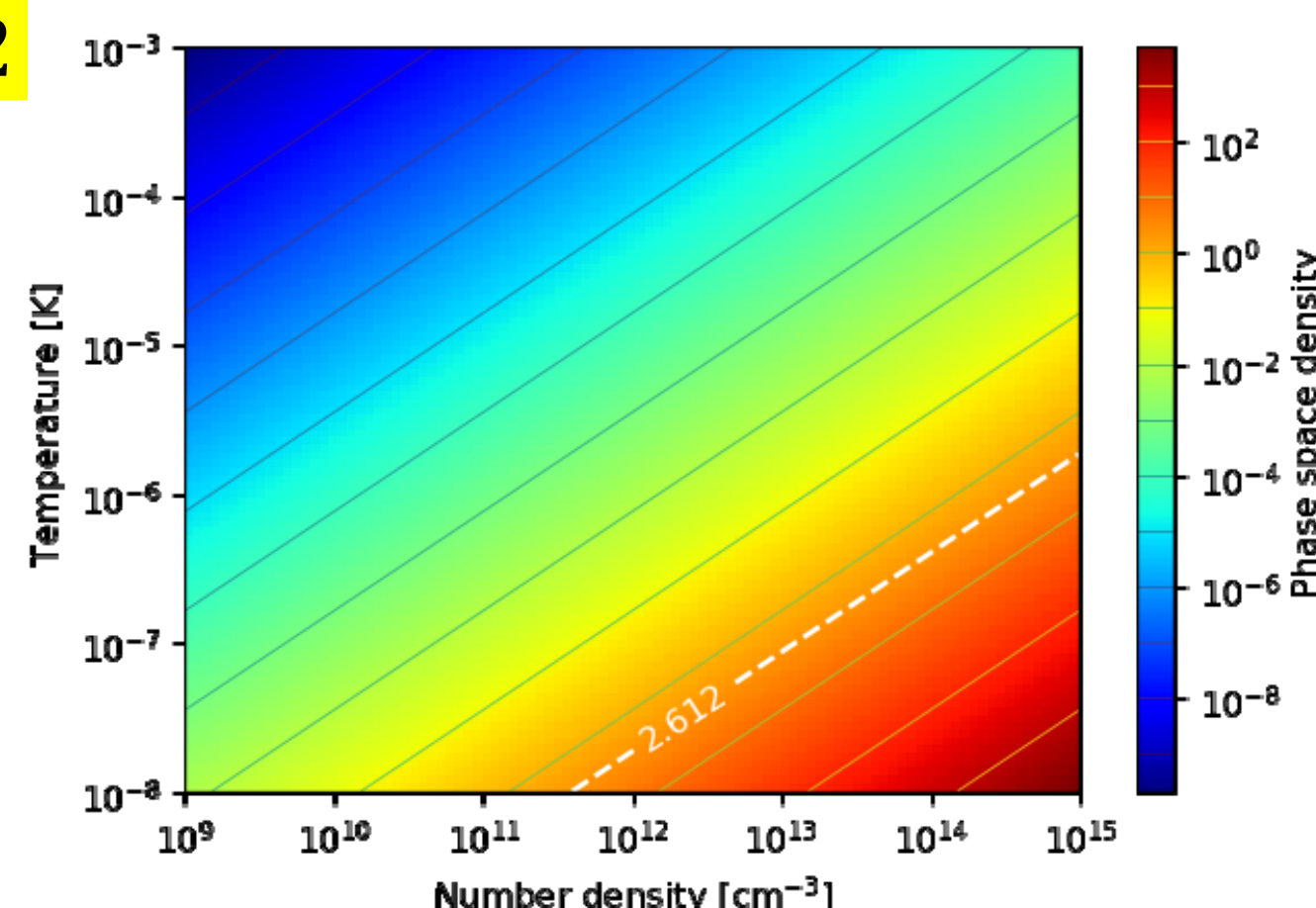


- ✓ 温度が下がると原子が「波」として振る舞い始める(原子の2重性)
- ✓ 絶対零度で全ての原子が重なり、1つの波として振る舞う (**Bose-Einstein condensation: BEC**)

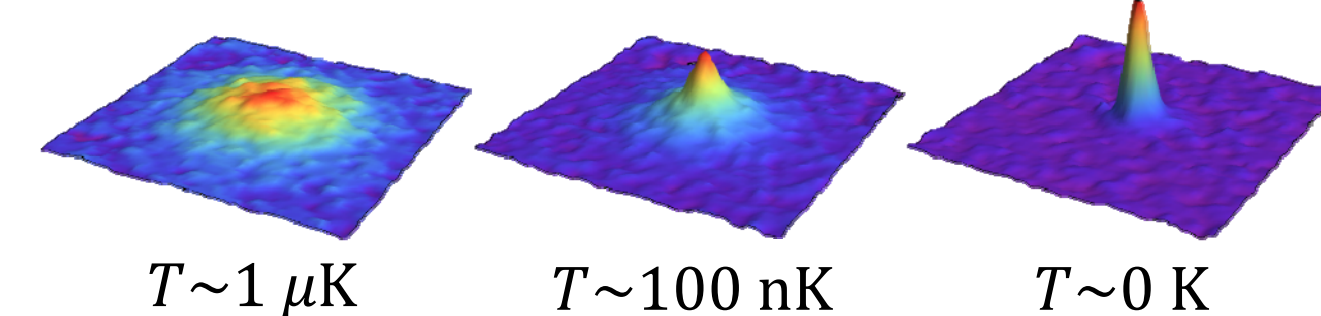
BECの条件

$$\rho = \lambda_{\text{dB}}^3 n \geq 2.612$$

$\lambda_{\text{dB}} = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k T}}$
 m : 原子質量
 k : ボルツマン定数
 n : 原子の数密度



BEC転移時の原子集団の速度分布



原子波の回折

