

ボース・アインシュタイン凝縮

「量子と光」第3回

平成26年10月24日

鳥井寿夫

参考資料

昭和38年7月2日第3種郵便物認可
2014年2月1日発行 第52巻2号 毎月1回1日発行

ISSN 0386-2240



特集

利用する物理 基礎理論はいかに応用されるか

巻頭言

特殊相対論 スピントロニクス

一般相対性理論 GPS

光格子時計 新しい時間標準

量子もつれ 量子暗号への道

ボース・アインシュタイン凝縮

物性におけるトポロジとその応用

ソフトマター物理学とその応用

【コラム】科学的発見から技術的応用までの過程

核分裂発見から原爆開発までを事例として

【コラム】導電性高分子の発見と開発

《数学的な感覚の探求》第14回

《連載》科学と社会 その18

情報幾何の新展開 その28

兵頭 俊夫

齊藤 英治

藤本 真克

香取 秀俊

都倉 廣弘

鳥井 寿夫

永長 直人

鈴木 康夫

三村 昌泰

岡本 拓司

甘利 俊一

楢本 彰彦

鈴木 康夫

三村 昌泰

岡本 拓司

甘利 俊一



特集/利用する物理

ボース・アインシュタイン凝縮



鳥井 寿夫

1. はじめに：20世紀の人、アインシュタイン

多くの人は、アインシュタイン（図1）といえば「相対性理論」というイメージを持っているのではないだろうか。事実、アインシュタインの名が世界的に広まったのは、1919年の皆既日食の際に太陽の近くを通る星からの光が一般相対性理論（1916年）の予言通りに曲がること観測されたときでした。また、アインシュタインといえば、原子力エネルギーを説明する際によく引き合いに出される有名な式 $E=mc^2$ を思い起こす人もいます。この式は質量とエネルギーの等価性を表すもので、特殊相対性理論（1905年）から導き出されたものです。米国のタイム誌は20世紀を代表する人物（person of the century）としてアインシュタインを選びましたが、20世紀の負の側面を象徴する原子爆弾の生みの親という、いささか間違ったイメージも影響しているのかも知れません。

このように相対性理論のイメージが強いアインシュ

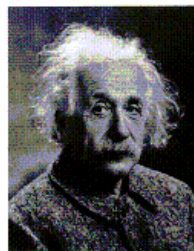


図1 20世紀を代表する人物、アルベルト・アインシュタイン。

タインですが、量子論の分野でも数多くの功績を残しています。おそらく一番有名なのは、1905年の光量子仮説でしょう。アインシュタインは、光が $E=hf$ ($h \approx 6.62 \times 10^{-34}$ Js はプランク定数、 f は光の周波数) というエネルギーを持つ粒子だと考えると、当時謎であった光電効果をうまく説明できることを見出しました（この功績により、アインシュタインは1921年のノーベル物理学賞を受賞しています）。また、1917年には「細射の量子論について」という論文において、遷移確率という概念を導入し、光量子の放出過程には自然放出と誘導放出（これはレーザーの原理です）の2種類があること、光量子の吸収・放出には運動量 $p=h/\lambda$ (λ は光の波長) が付随すること、など多くの重要な発見をしています。そして1925年、シュレーディンガー、ハイゼンベルグ、ディラックらによって量子力学が定式化される以前に、ボース・アインシュタイン凝縮（BEC: Bose-Einstein condensation）と呼ばれる特異な量子現象を予言します¹⁾。これが本稿のメインテーマです。アインシュタインが量子力学の発展にどのように寄与したのか、以下でもう少し詳しく見ていくこととなりますが、その概要を図2に示しておきます。

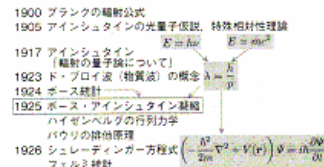
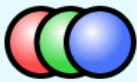
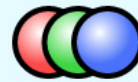


















図2 量子力学形成の歴史。アインシュタインが多く貢献している。

素粒子の一覧表

		物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons				
		I	II	III	電磁気力 electromagnetic				
クォーク quarks		 U : up	 C : charm	 t : top	強い力 strong	 g : gluon			
		 d : down	 S : strange	 b : bottom		弱い力 weak	 Z ⁰ : Z boson	 W ⁺ : W ⁺ boson	 W ⁻ : W ⁻ boson
		 e : electron	 μ : muon	 τ : tau			ヒッグス粒子 Higgs bosons		
	レプトン leptons		 ν _e : electron neutrino	 ν _μ : muon neutrino	 ν _τ : tau neutrino	 H ⁰ : Higgs boson			 H ⁺ , H ⁻ , h, A ⁰

量子力学的な粒子の性質

- 全ての粒子はボゾンかフェルミオンに分類され、同種粒子は原理的に区別できない(不可弁別性)

ボゾン

- スピンの大きさが整数
- 一つの量子状態に複数の粒子が占有できる

(例) 光子、 4He 、 7Li 、 23Na 、 87Rb

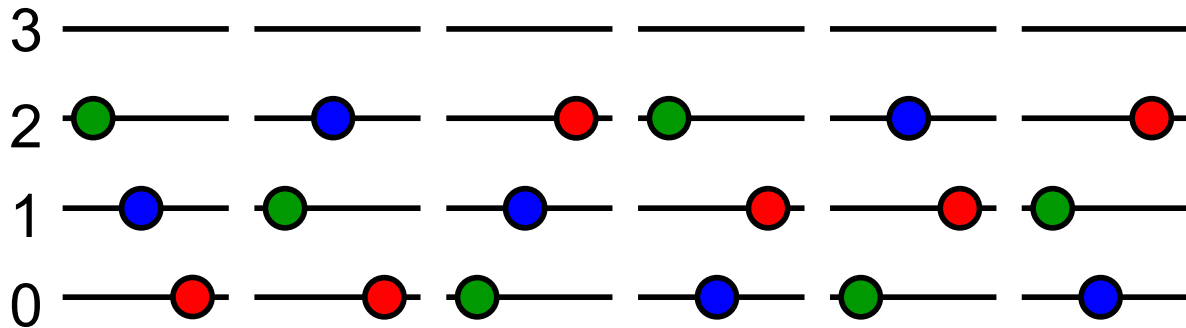
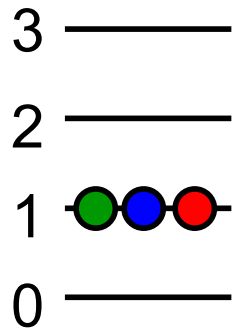
フェルミオン

- スピンの大きさが半整数
- 一つの量子状態に一つの粒子しか占有できない

(例) 電子、陽子、中性子
 3He 、 6Li

3 粒子, 全エネルギー = 3

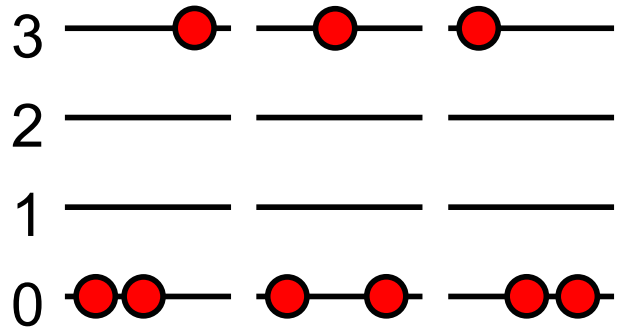
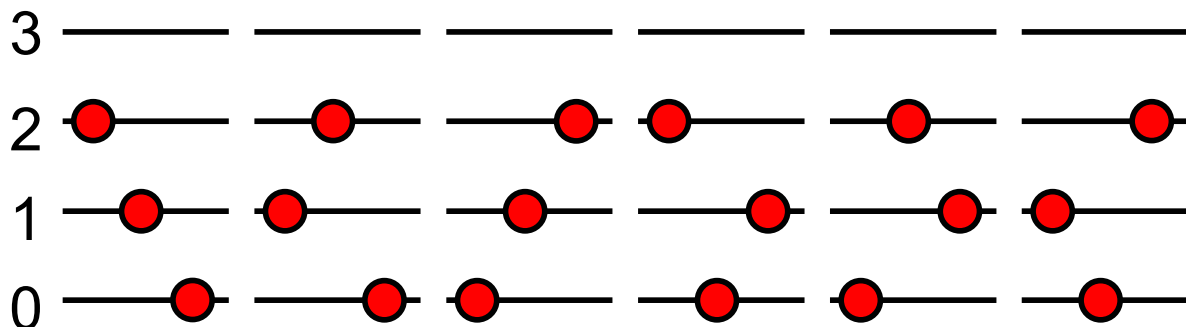
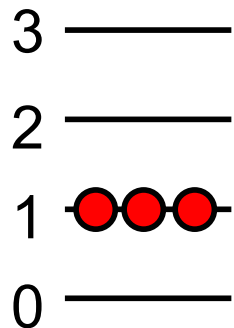
古典論



3	—●—	—●—	—●—	3	10%
2				6	20%
1				9	30%
0	●●—	●●—	●●—	12	40%

3 粒子, 全エネルギー = 3

粒子に区別なし



3 粒子, 全エネルギー = 3

ボゾン

3 ———

2 ———

1 ●●●

0 ———

3 ———

2 ●

1 ●

0 ●

3 ●

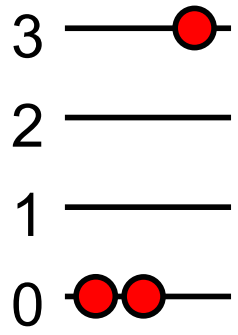
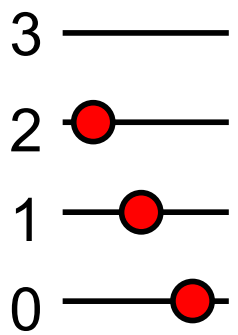
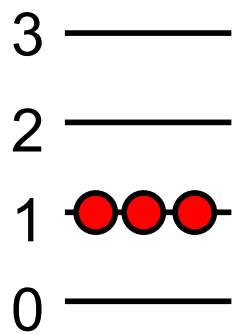
2 ———

1 ———

0 ●●

3 粒子, 全エネルギー = 3

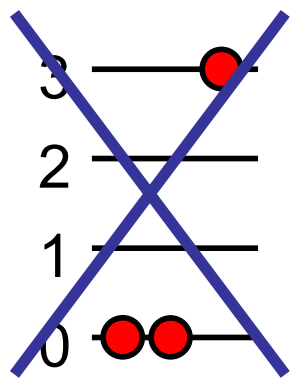
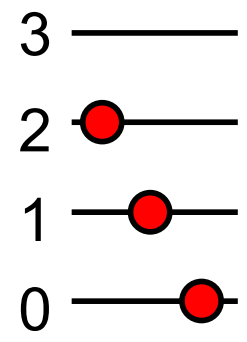
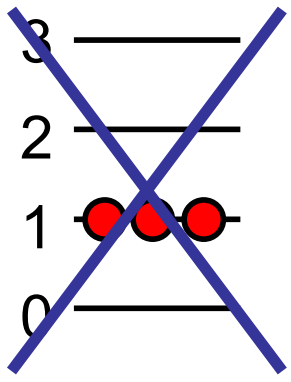
ボゾン



1	11%
1	11%
4	44%
3	33%

3 粒子, 全エネルギー = 3

フェルミオン

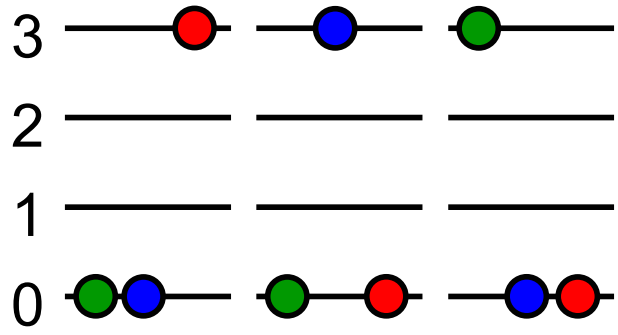
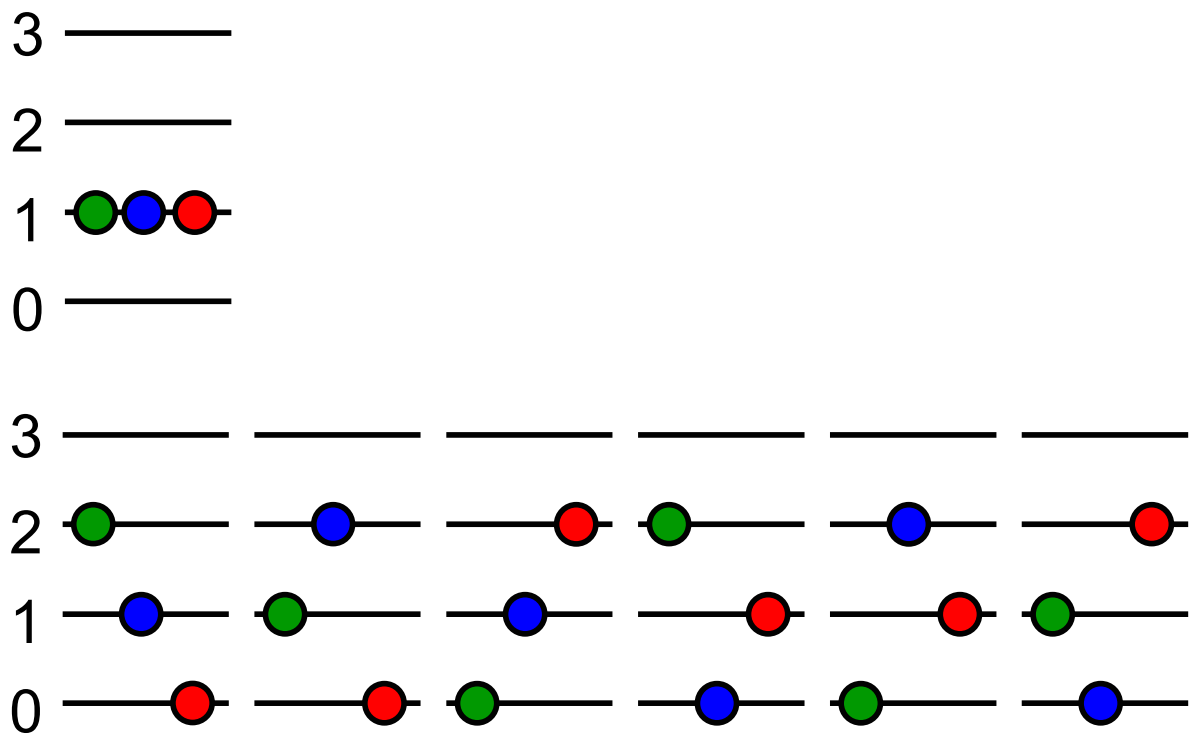


	フェルミオン	ボゾン	古典論
0	0%	11%	10%
1	33%	11%	20%
1	33%	44%	30%
1	33%	33%	40%

3 粒子, 全エネルギー = 3

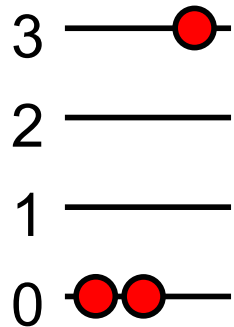
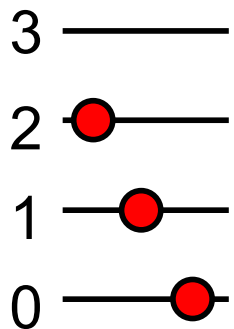
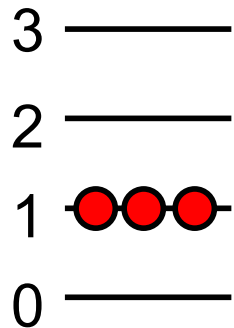
古典論

3人一緒の確率は
10%



2人一緒の確率は
30%

3 粒子, 全エネルギー = 3



ボゾン

3人一緒の確率は
33 %

Bosons は群れたがる!
Fermions は一人が好き!

2人一緒の確率も
33 %

$$n(\varepsilon) =$$

↑
エネルギーが ε の
量子状態を占有
する平均粒子数

$$\frac{1}{e^{(\varepsilon-\mu)/k_B T}}$$

古典論
ボルツマン分布

$$\frac{1}{e^{(\varepsilon-\mu)/k_B T} - 1}$$

ボゾン
ボース・アインシュタイン
分布

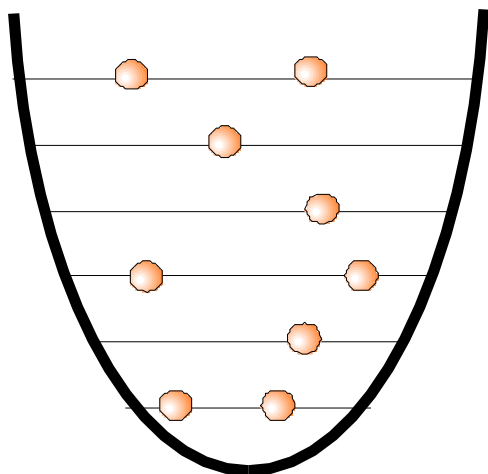
$$\frac{1}{e^{(\varepsilon-\mu)/k_B T} + 1}$$

フェルミオン
フェルミ・ディラック
分布

ボース・アインシュタイン凝縮とは

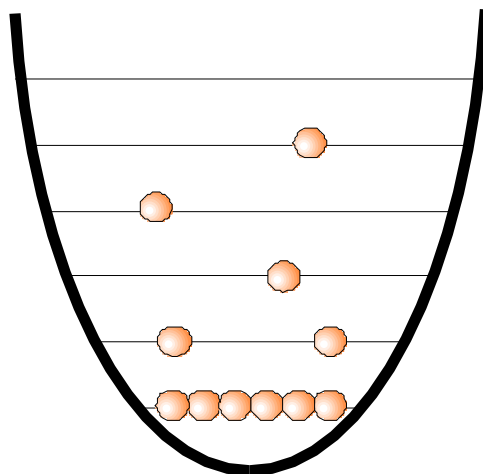
ボース統計に従う粒子(ボゾン)の集団を、ある温度以下に冷却すると、最低エネルギー状態を占める粒子数が突然マクロな数になる現象

$$T > T_c$$



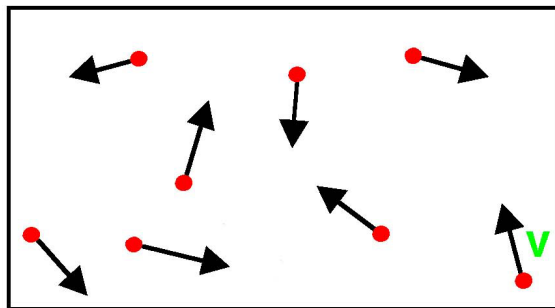
$$N_0 / N \approx 0$$

$$T < T_c$$



$$N_0 / N \approx 1$$

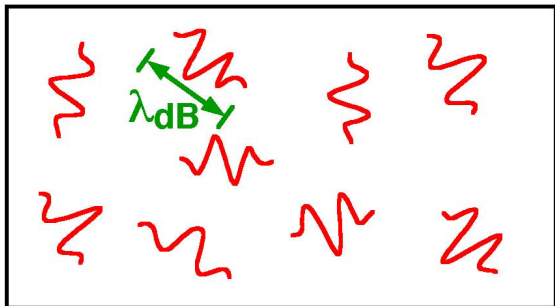
$T \sim 300\text{K}$



原子は粒子のように振舞う

レーザー冷却

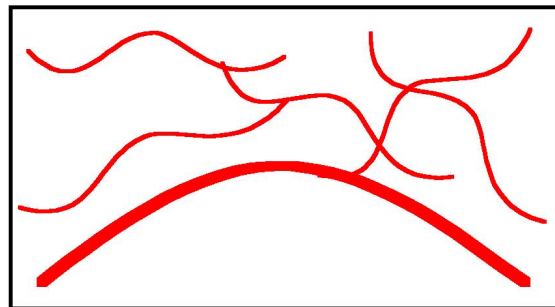
$T \sim 1\text{mK}$



粒子の波動性が顕著になる

蒸発冷却、レーザー冷却

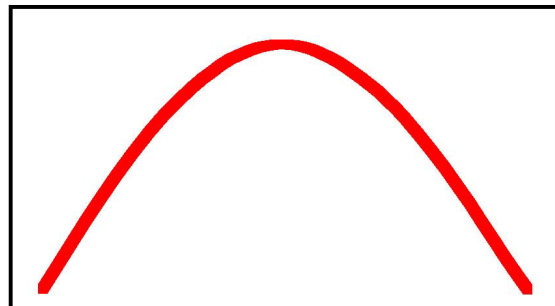
$T \sim 1\mu\text{K}$



波が重なり始める
(ボース統計性が顕著になる)

蒸発冷却

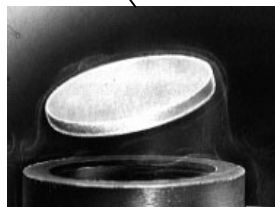
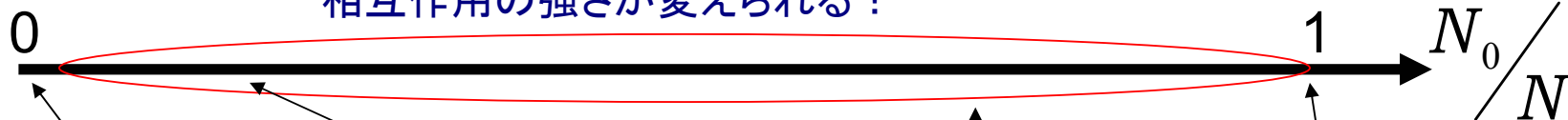
$T \sim 100\text{nK}$



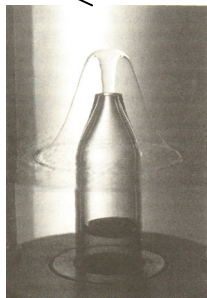
一つの巨大な波
(ボース・アインシュタイン凝縮)

ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)の仲間達

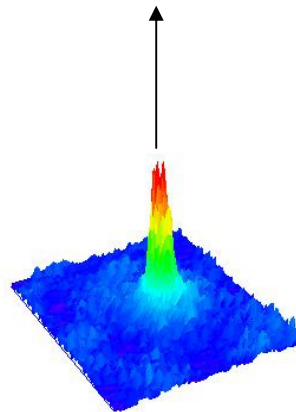
相互作用の強さが変えられる!



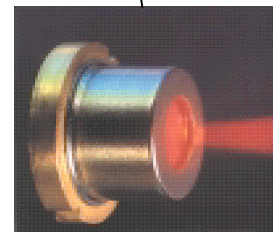
電子対(クーパ対)の
BEC(超伝導)



液体ヘリウム原子
のBEC(超流動)



気体原子のBEC
(原子レーザー)



光子のBEC
(レーザー)

ボース・アインシュタイン凝縮の歴史

- 1911 水銀で超伝導 (Onnes) $\sim 4.2\text{K}$
 - 1923 物質波の概念 (de Broglie)
 - 1924** ボース統計、ボース凝縮の理論 (Bose, Einstein)
 - 1925 行列力学 (Heisenberg)
 - 1926 波動力学 (Schrödinger)
 - 1927 液体ヘリウムの λ 転移 $\sim 2.17\text{K}$
 - 1933 マイスナー効果 (Meissner)
 - 1937 液体ヘリウムの超流動 (Kapitza)
 - 1938** ボース凝縮による超流動の説明 (London) — 転移温度の理論値: 3.13K

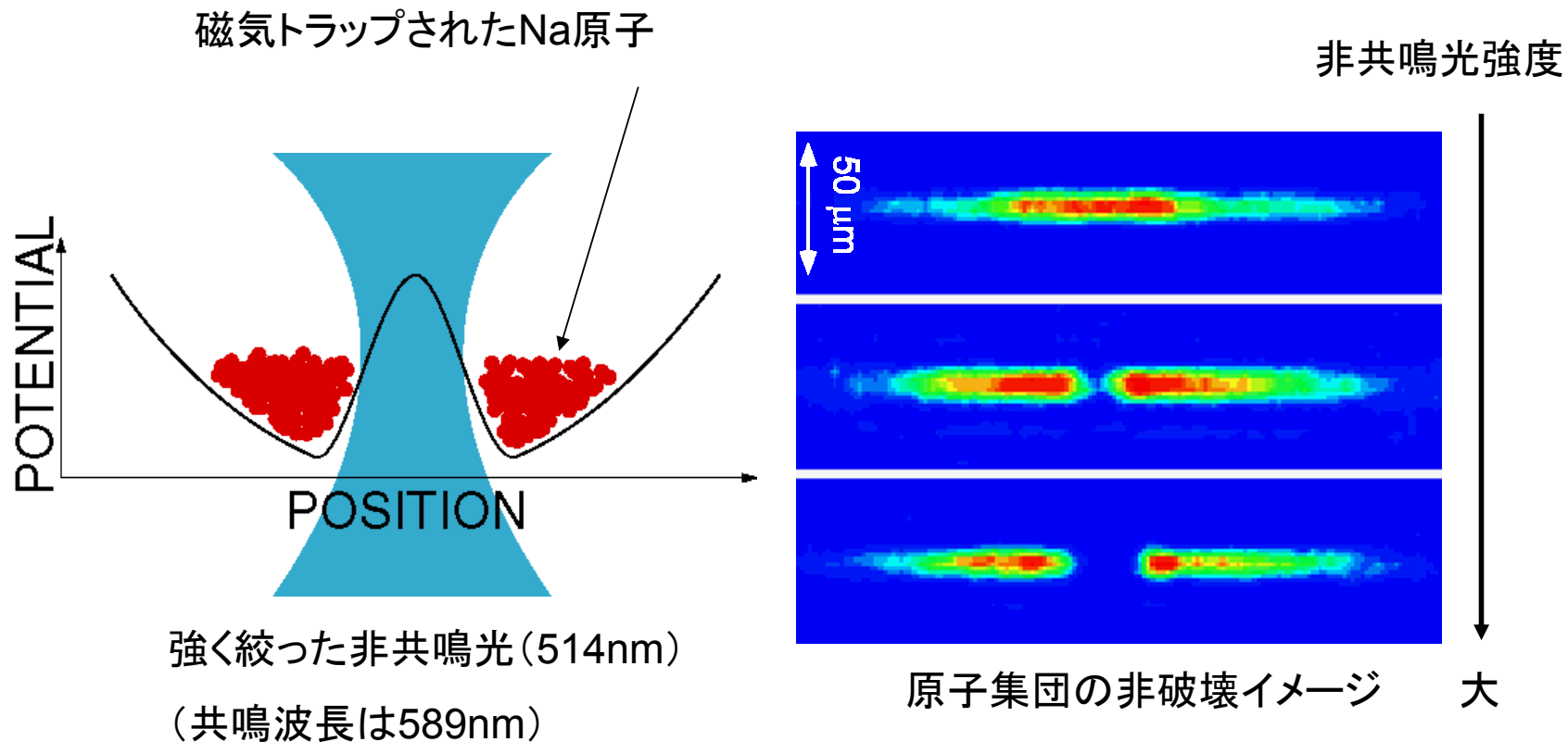
 - 1957 BCS理論による超伝導の説明 (Bardeen, Cooper, Schrieffer,)
 - 1960 レーザーの発明 (Maiman)

 - 1975 レーザー冷却のアイデア (Hänsch, Shallow)

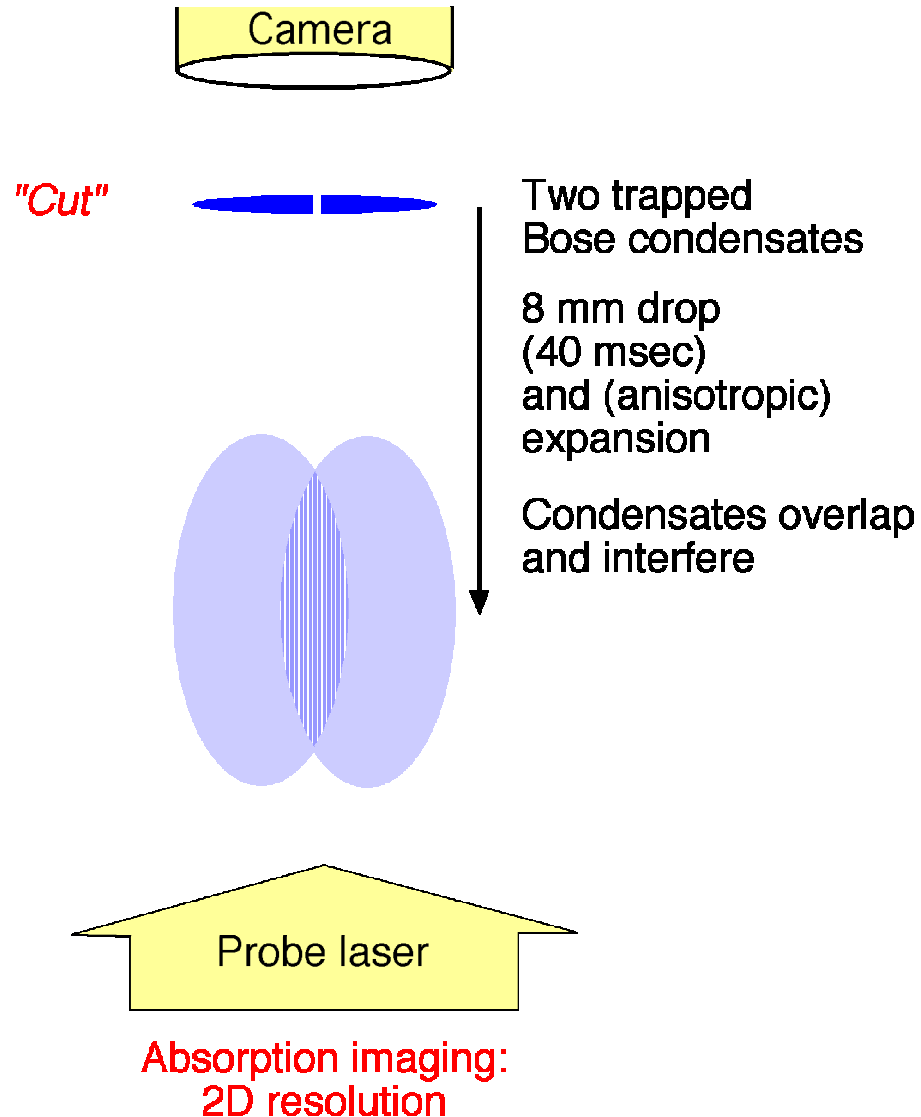
 - 1980~ レーザーによる原子線の減速 (Phillips他) $\sim \text{mK}$
 - 1985 レーザーによる3次元冷却 (Chu) $\sim 240 \mu\text{K}$
 - 1988 偏向冷却 (Phillips, Cohen-Tannoudji) $\sim 3 \mu\text{K}$

 - 1995** 蒸発冷却、ボース凝縮実現
(Cornel, Wieman, Ketterle) $\sim 100\text{nk}$
- 1997年ノーベル物理学賞
- 2001年ノーベル物理学賞

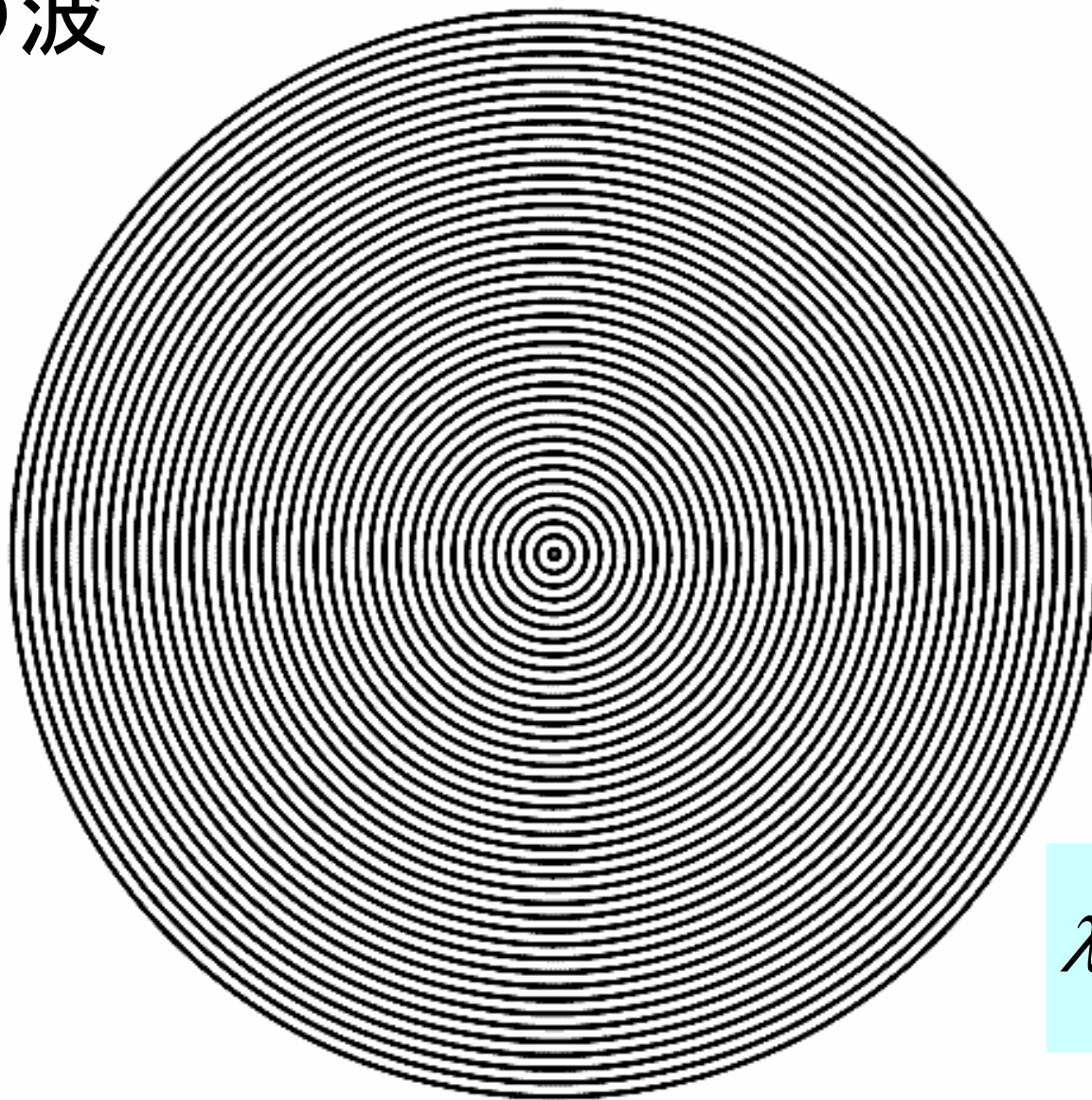
独立なBECの作り方



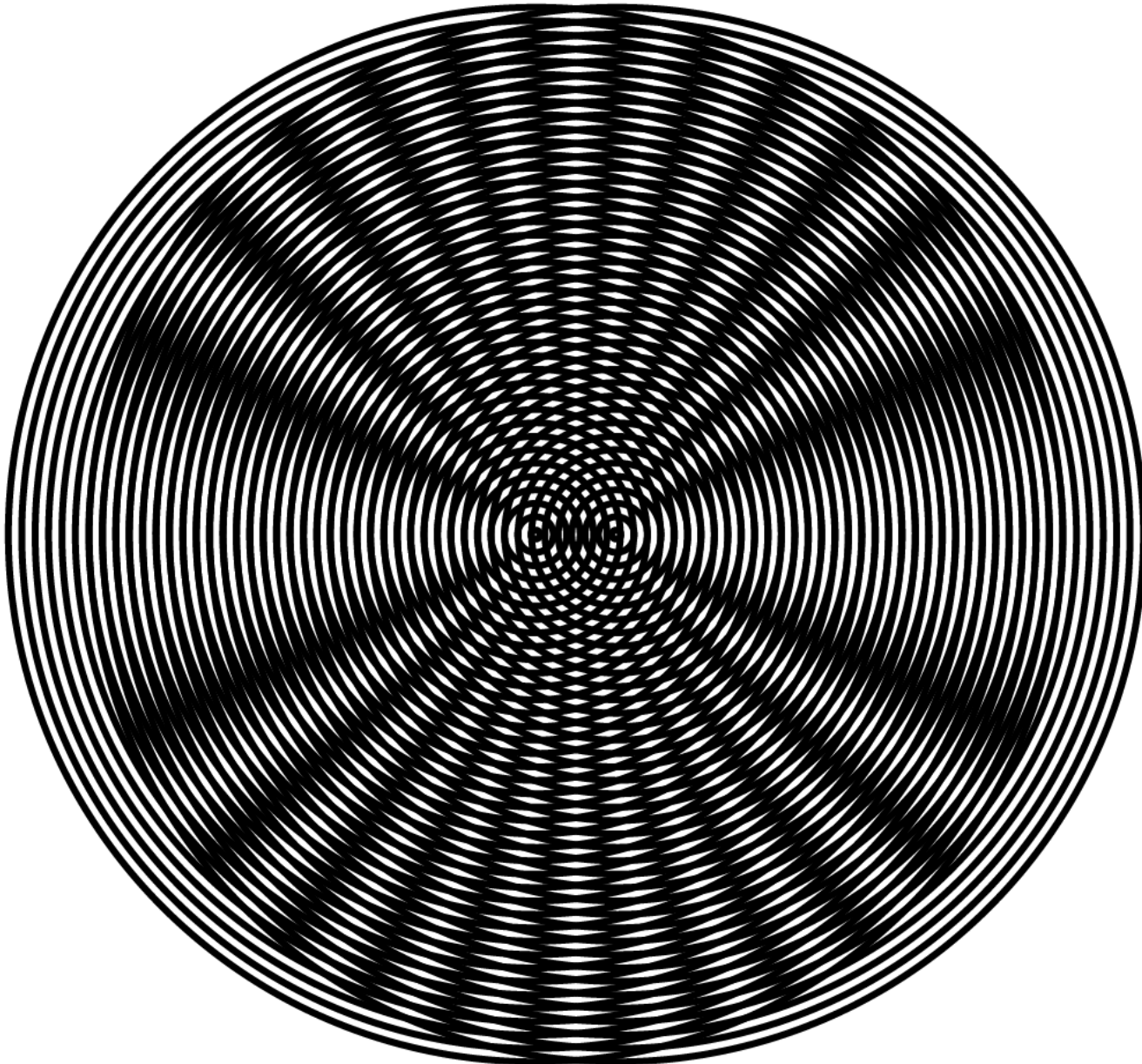
Interference of two condensates



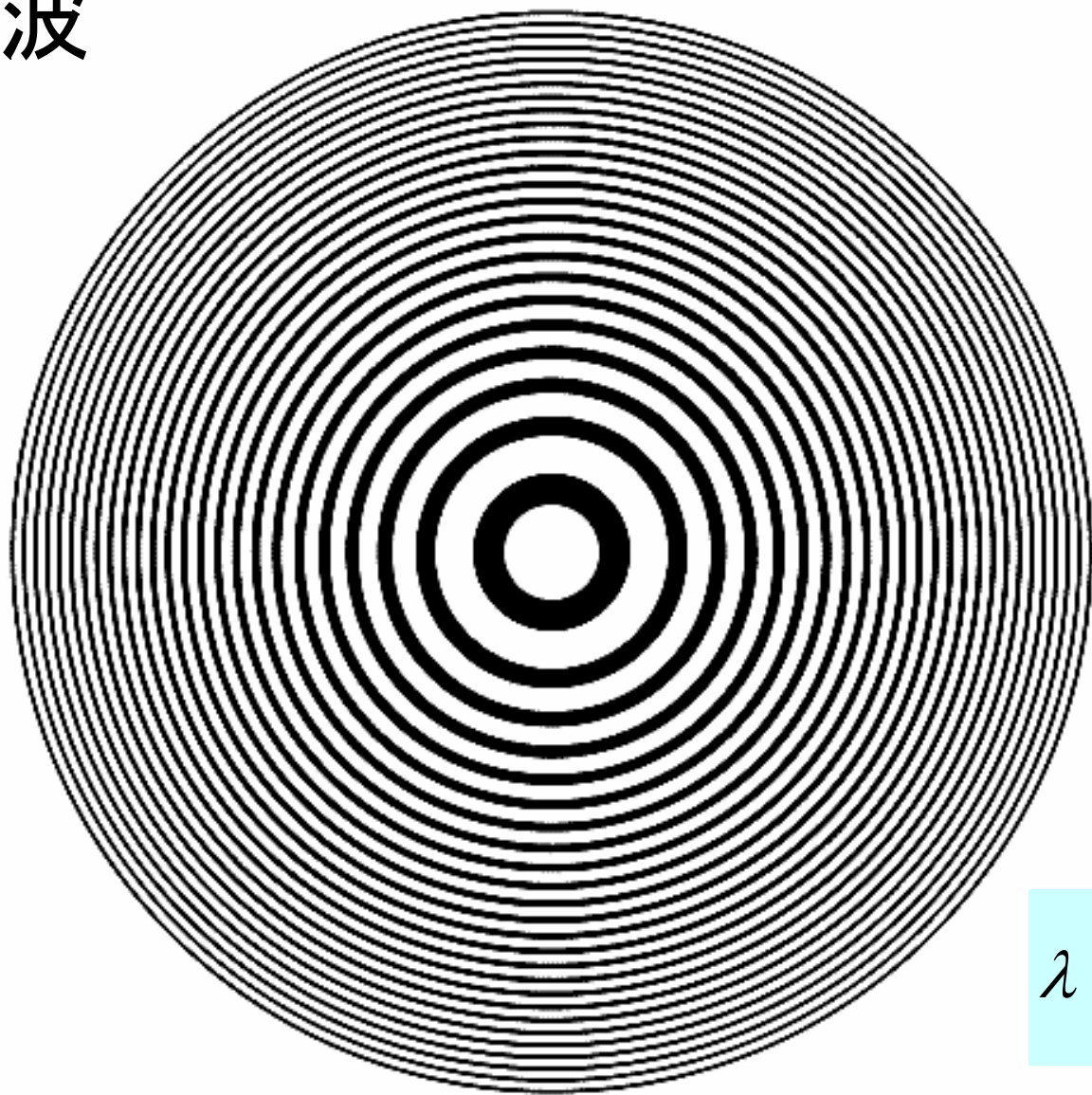
光の波



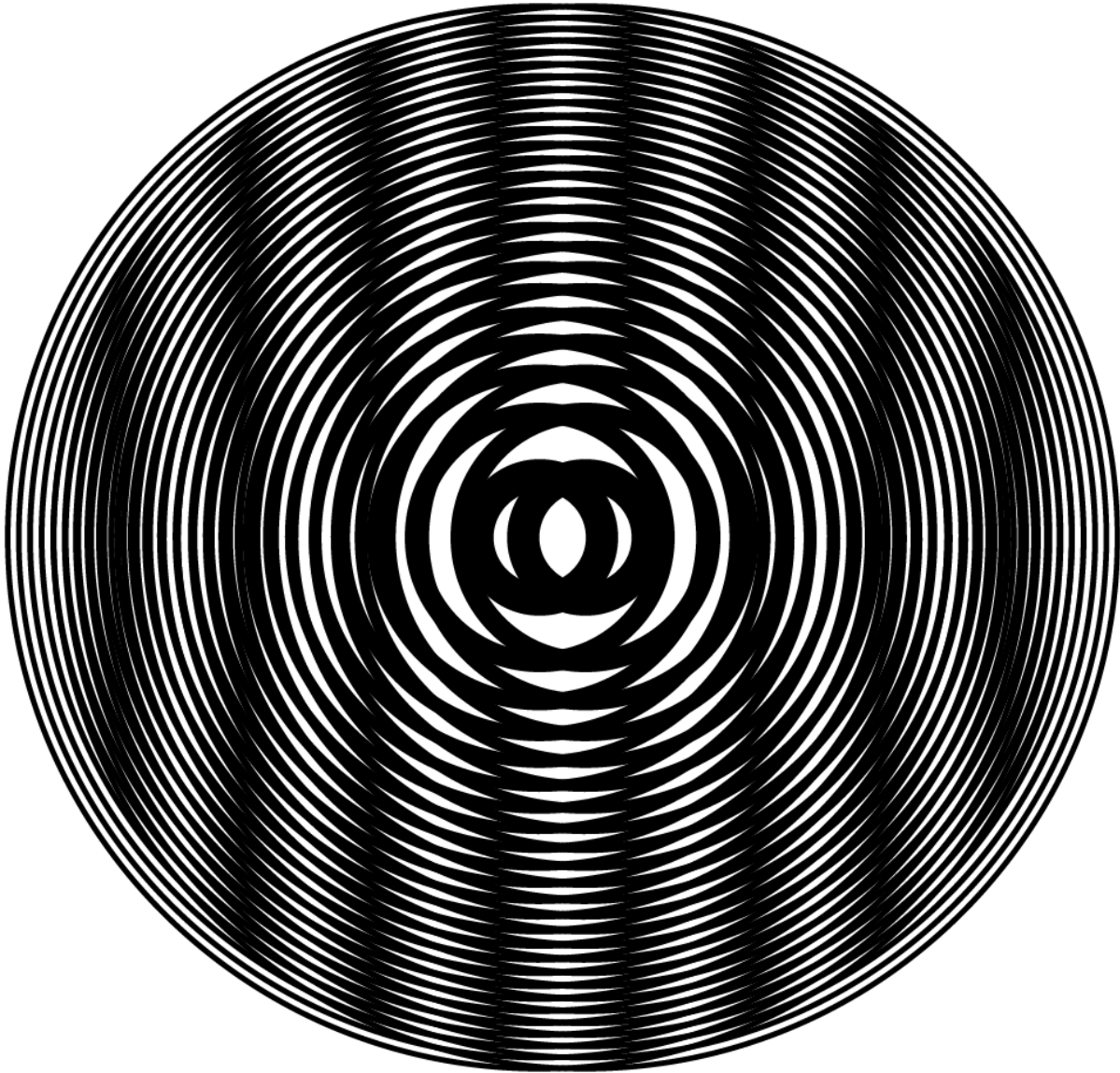
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$



物質波



$$\lambda = \frac{h}{mv}$$



独立なBEC間の干渉

