

量子航法で超高精度な位置測定

冷たい原子がGPSを置き換える？



自己紹介

- さめ (MEΓ-CCK)
 - 🌸 VRChat物理学集会の主催
 - 🎓 社会人学生として通信制大学在学中
- 得意分野:
 - 📷 コンピュータビジョン (画像認識 / 点群処理)
 - 🌐 空間情報処理 (地理情報 / リモートセンシング)
 - ☁️ クラウドインフラ設計 / IaC (AWS, GCP)
- 学生時代は地球物理学を専攻
- 地球観測技術のエンジニアとして活動中



今日話すこと

- 慣性航法の基礎と課題（誤差蓄積問題）
- 冷却原子を使う理由（コヒーレンス）
- 原子干渉計の原理（ラマン遷移）
- 量子センサーの優位性
- 実用化の動向（2025年）

※ 本日は**加速度測定**に注目。ジャイロ（回転測定）は割愛

慣性航法

移動距離 = 速さ × 時間

- 等速運動の場合: $x = vt$
- 🚢 ボートから 🏴‍☠️ 結び目(knot)付きのロープを投げて砂時計の砂が落ちるまでの時間にいくつの結び目が落ちたかを数える
 - 最も単純な慣性航法、速度の単位ノットの由来



VTグラフと移動距離

- 速度-時間グラフの**面積** = 移動距離
- 速度が変化しても、細かく分割して足し合わせればOK
- これが**積分**の考え方

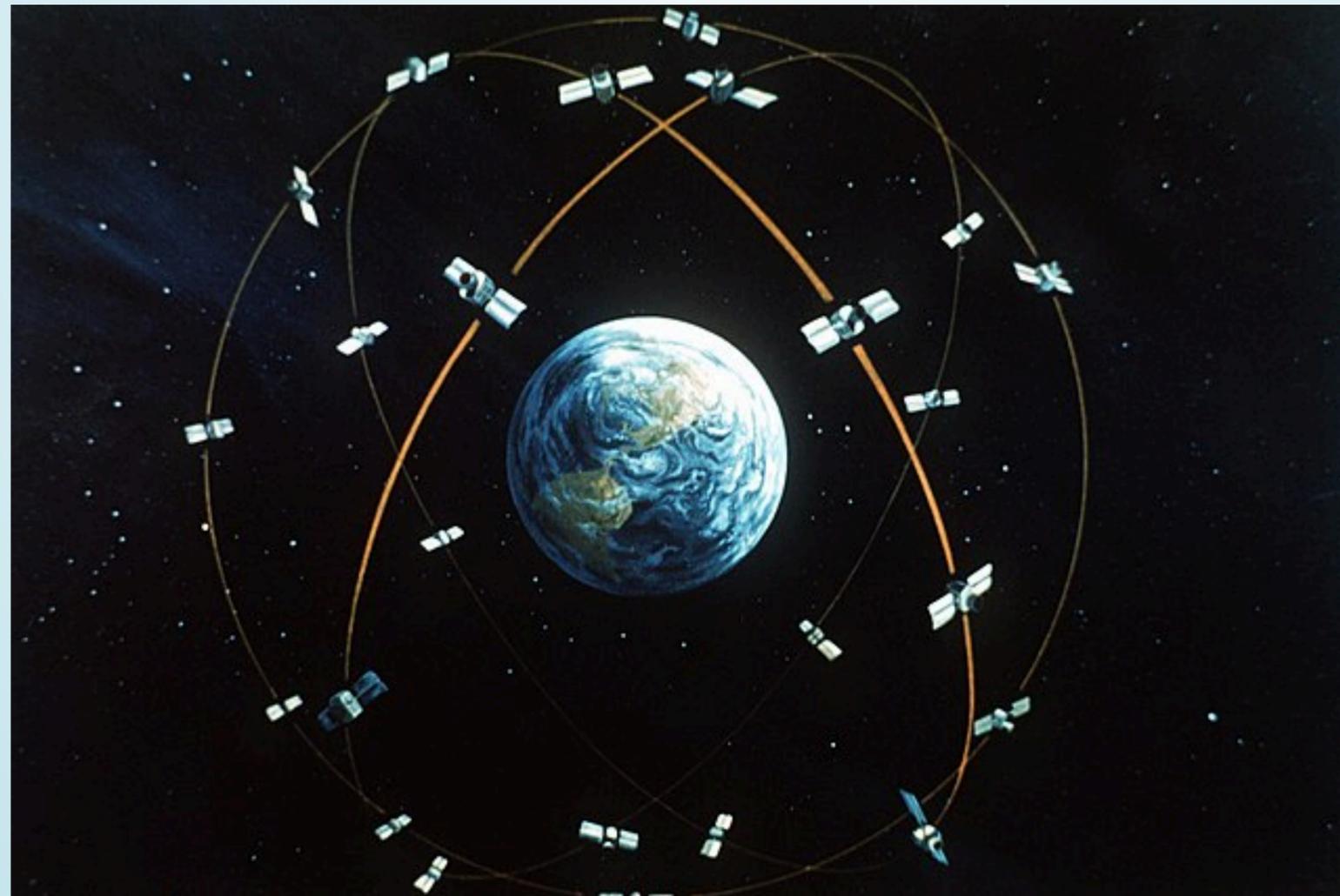
$$x(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau$$

慣性航法の原理

- 加速度を**二重積分**して位置を求める
 - $a \xrightarrow{\int dt} v \xrightarrow{\int dt} x$
- なぜ速度を直接測らない？
 - 飛行機の中で速度を感じるのは離着陸の時だけ
 - 等速運動中は外を見ないと自分の速度がわからない
 - 速度測定には**外部基準**が必要 → 慣性航法は**自己完結型**

現状の解決策：GNSS補正

- 慣性航法の誤差蓄積を外部情報で定期的に補正
- GPS等の衛星測位システム（GNSS）
- 現在の航空機・船舶・自動車ナビの標準的な手法



誤差蓄積問題

- 加速度のわずかな誤差 δa が位置誤差 δx に拡大
- 二重積分なので誤差は時間の二乗に比例

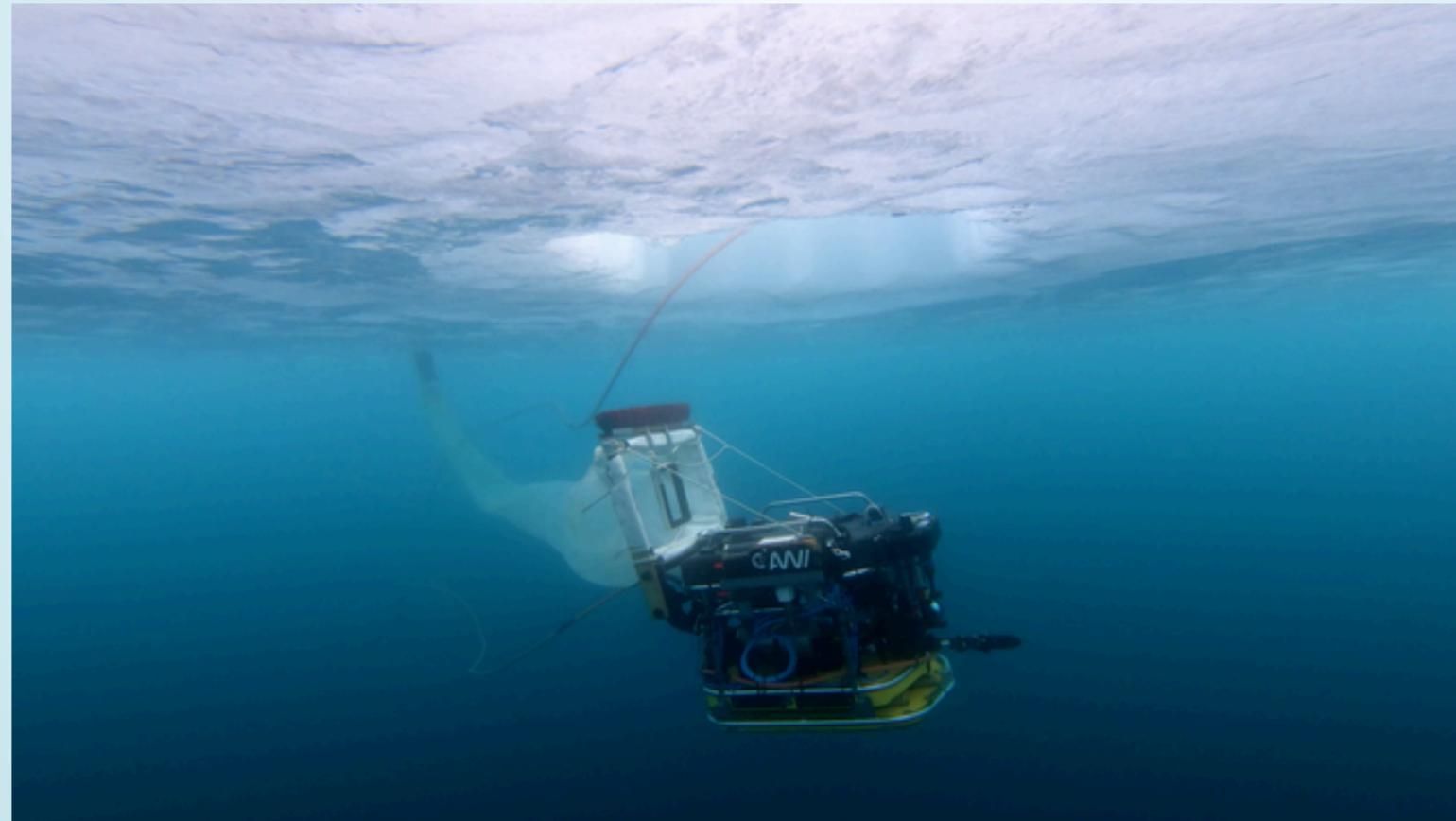
$$\delta x \sim \frac{1}{2} \delta a \cdot t^2$$

- 現在のMEMS加速度計の精度限界
 - 民生用: $\sim 10^{-2} \text{ m/s}^2$ (スマホ等)
 - 航空機用: $\sim 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (高精度MEMS)
- 航法用でも10時間後に**約6.5km**のずれ

GNSSの限界

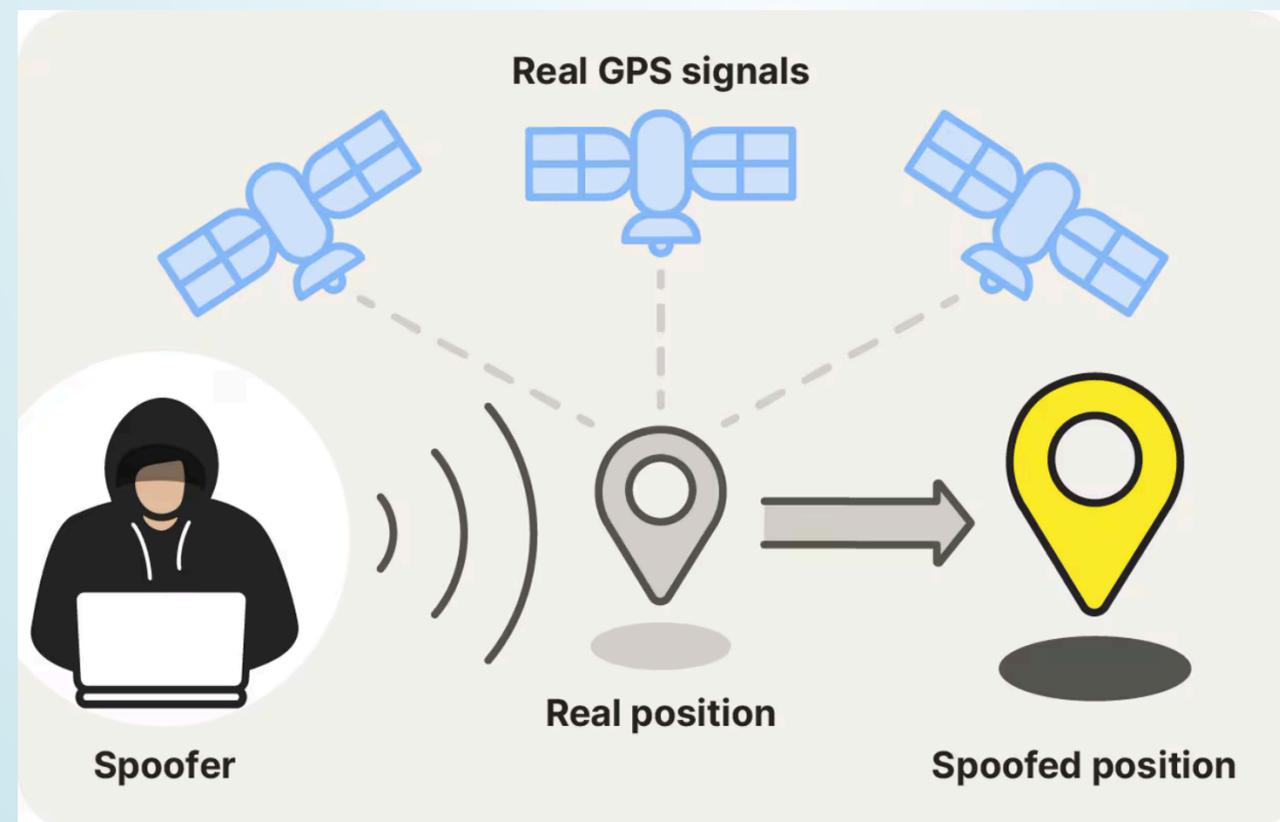
衛星の電波が届かない場所では使用不可

- 水中（潜水艦、水中ドローン）
- トンネル・地下空間



GNSSへの脅威

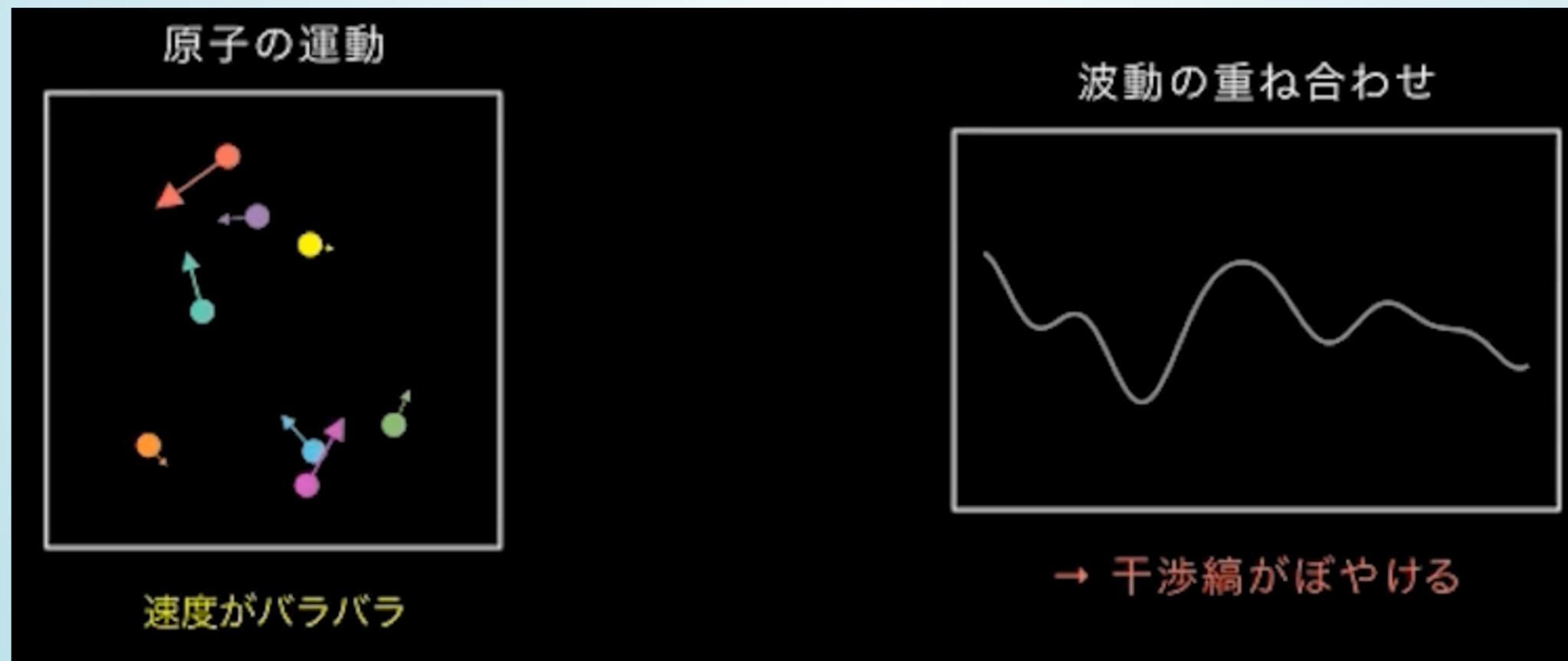
- **GNSSへの悪意のある攻撃**
 - **スプーフィング**: 偽のGPS信号で位置を誤認
 - **ジャミング**: 妨害電波でGPS受信を阻害
- 軍事・重要インフラでは深刻な脅威



冷却原子の波動性

なぜ冷却原子？

- 原子干渉計で加速度を超高精度に測定するため
- 冷却すると原子の波としての性質が際立つ
- 波の干渉を使って加速度を測る → 波長が揃っていないとダメ



原子の波動性（ド・ブロイ波）

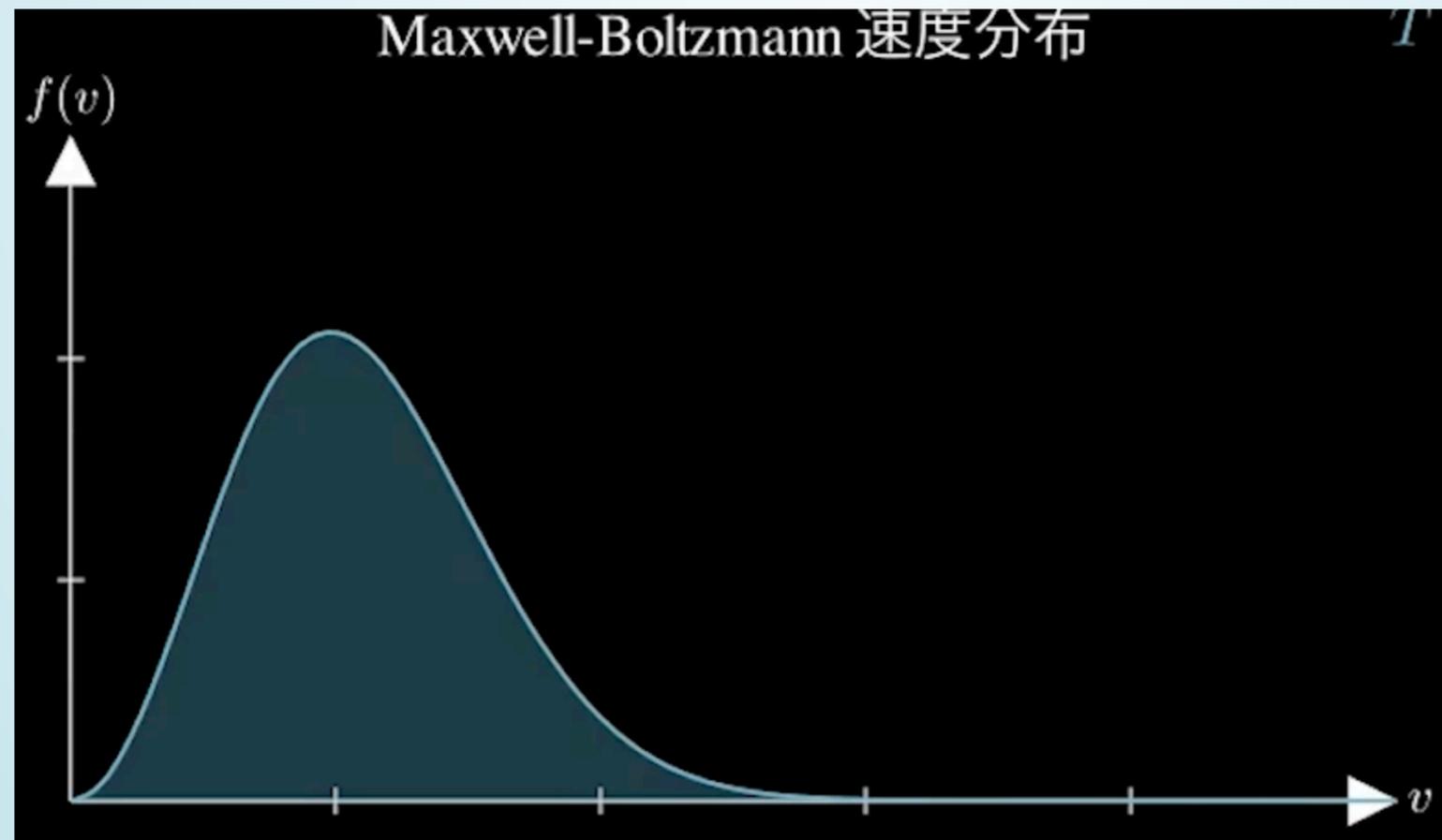
すべての物質は波としての性質を持つ

$$\lambda_{\text{dB}} = \frac{h}{mv}$$

- h : プランク定数、 m : 質量、 v : 速度
- 速度が**ばらつく**と波長も**ばらつく** → 干渉縞がぼやける
- 冷却して速度分布を狭くする → 波長が揃う → コヒーレンス向上

温度と速度分布

- 熱い原子：様々な速度でバラバラに動く
- 冷たい原子：速度分布が狭くなり、波長が揃う
- 熱的ド・ブロイ波長: $\lambda_{\text{th}} \sim \frac{h}{\sqrt{mk_B T}}$

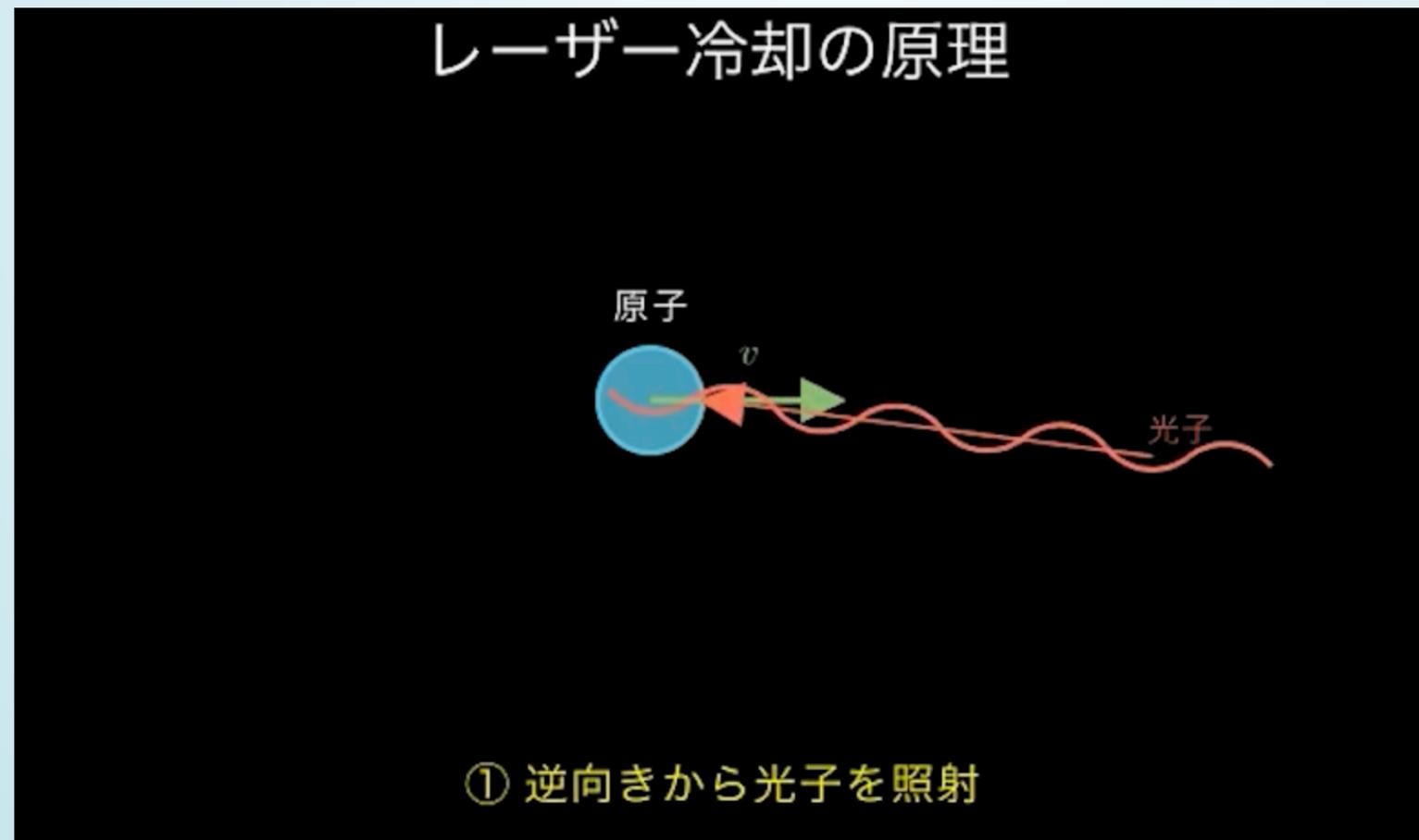


実用的な冷却レベル

- **レーザー冷却 (数 μK) :**
 - 現在の原子干渉計はこのレベル
 - 速度分布が十分狭く実用的なコヒーレンス
- **ボース=アインシュタイン凝縮 (数百 nK 以下) :**
 - 究極のコヒーレンスだが研究段階

レーザー冷却の原理

- 原子にレーザー光を当てて減速
- 光子を吸収すると運動量を受け取る
- 原子の進行方向と逆向きに照射 → 減速



ドップラー冷却

- ドップラー効果を利用
 - 近づく原子は青方偏移 → 共鳴
 - 遠ざかる原子は赤方偏移 → 非共鳴
- 赤方偏移したレーザーで「速い原子だけ」減速

原子干渉計の原理

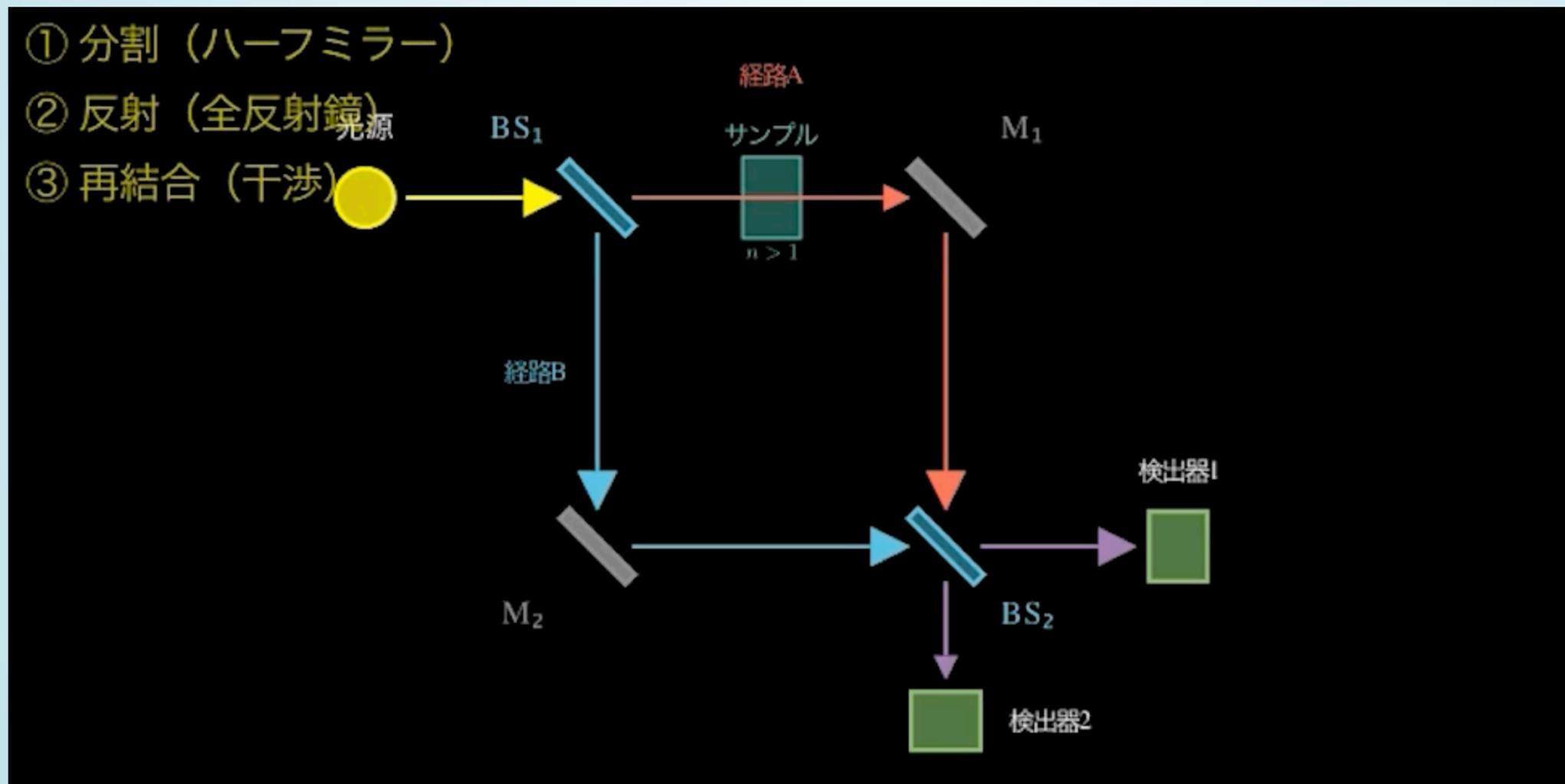
マツハツェンダー型干渉計

光学干渉計と原子干渉計の対応

要素	光学系	原子系
波	光子	ド・ブロイ波
ビームスプリッター	ハーフミラー	$\pi/2$ パルス
ミラー	全反射鏡	π パルス

光学的マッハツェンダー干渉計

- 光を2つの経路に分け、干渉させる
- 経路差に応じて干渉縞が変化



ラマン遷移

2本のレーザー（周波数差 = 超微細構造）を照射

- 内部状態が変化: $|g\rangle \leftrightarrow |e\rangle$
- 運動量が変化: $\hbar k_{\text{eff}}$ を受け取る

- $|g\rangle$ 状態 \rightarrow 運動量そのまま
- $|e\rangle$ 状態 \rightarrow 運動量 $+\hbar k_{\text{eff}}$
- **状態と運動量が相関** \rightarrow 経路が分岐

$\pi/2$ パルスと π パルス

$\pi/2$ パルス (分割・再結合)

$$|g\rangle \rightarrow \frac{|g\rangle + |e\rangle}{\sqrt{2}}$$

- 重ね合わせ状態を生成
- ハーフミラーに相当

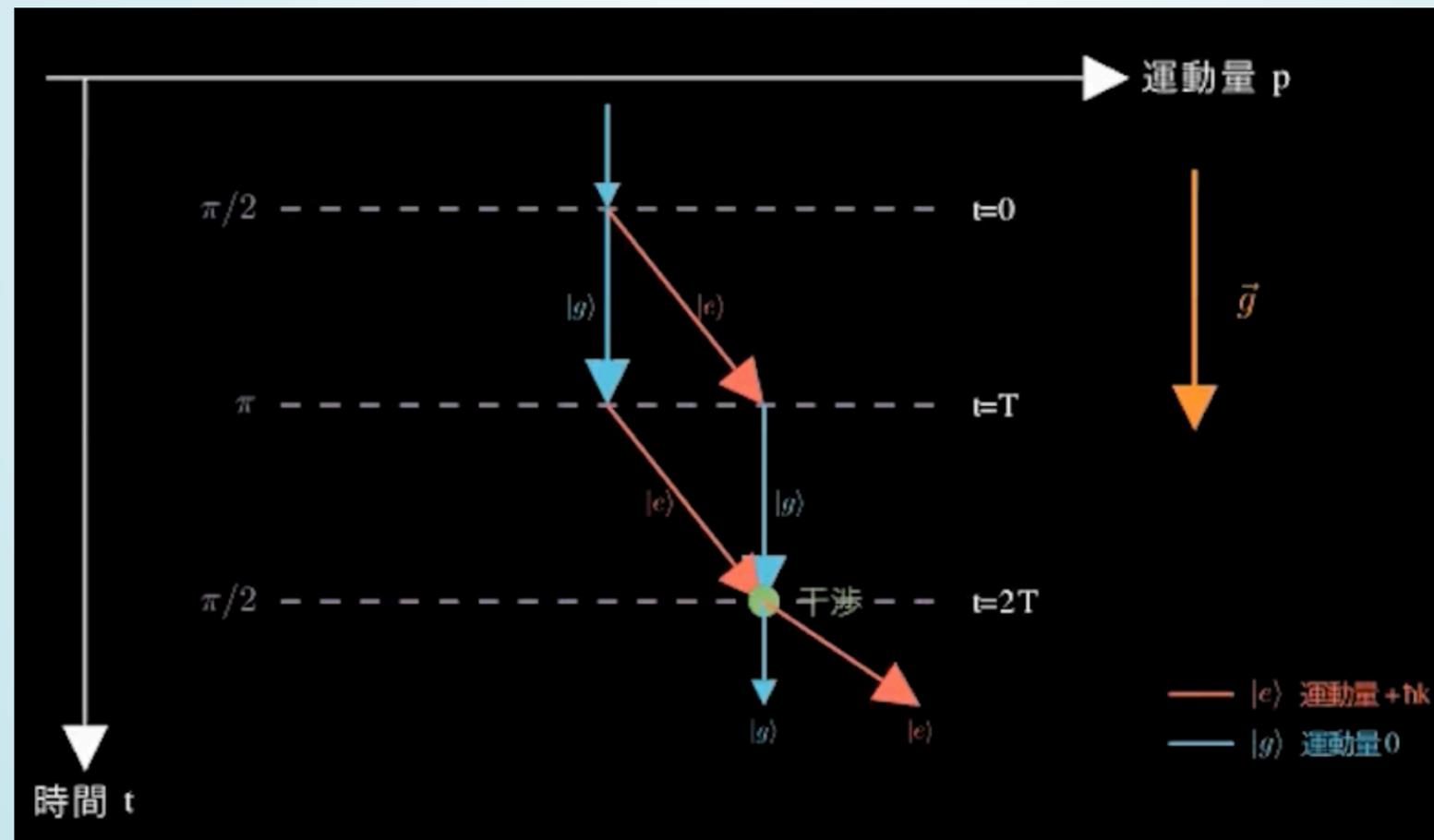
π パルス (反転)

$$|g\rangle \leftrightarrow |e\rangle$$

- 状態を完全に反転
- ミラーに相当

パルスシーケンス

- 時刻0: $\pi/2$ パルスで分割
- 時刻T: π パルスで反転
- 時刻2T: $\pi/2$ パルスで再結合



経路の分岐と干渉

- 経路A: 状態 $|e\rangle$ 、運動量 $+\hbar k$
- 経路B: 状態 $|g\rangle$ 、運動量 0
- 運動量差により異なる軌跡を辿る

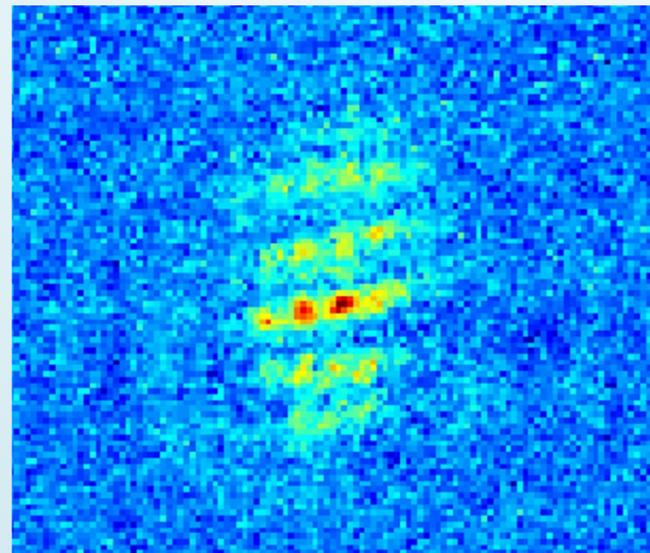
加速度 a がある系では位相差が蓄積

$$\Delta\phi = k_{\text{eff}} \cdot a \cdot T^2$$

干渉の読み出し

- 最終状態の占有確率として位相差が現れる
- P_g から加速度 a を逆算

$$P_g = \cos^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right)$$



二重スリット実験との対応

二重スリット	原子干渉計
スクリーン位置 x	内部状態 $ g\rangle$ or $ e\rangle$
$P(x)$ の空間分布	P_g の値
多数電子で干渉縞	多数原子で確率決定

本質は同じ: **確率振幅の重ね合わせ**が干渉として観測される

量子航法への応用

- 今回は**重力方向**（自由落下）を例にしたが、**どの方向でも同様**
- 3軸に配置 → 加速度ベクトル $\vec{a} = (a_x, a_y, a_z)$ を測定

$$\vec{a} \xrightarrow{\int dt} \vec{v} \xrightarrow{\int dt} \vec{x}$$

加速度を2回積分して**自己位置推定**（従来の慣性航法と同じ原理）

従来のMEMS加速度計

- 精度: $\sim 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (航法用)
- ドリフト誤差が蓄積
- 10時間で約6.5kmのずれ

原子干渉計

- 精度: $\sim 10^{-9\sim-12} \text{ m/s}^2$
- 原子遷移周波数が基準
- ドリフトが極めて小さい

4桁以上の精度向上 → GNSSフリーで高精度な航法が可能

実用化の動向（2025年）

実証実験の成功が数多く報告

- **ボーイング社**: 4時間GPS不要飛行
- **Q-CTRL社**: セスナ機で22m精度 (TIME誌2025年ベスト発明賞受賞)
- **英国海軍**: 潜水艦での試験成功

- 研究途上だが次世代の測位技術として高い注目
- **技術革新とコスト削減**が商用化の課題

まとめ

1. **慣性航法の課題**: 加速度計の誤差が積分で蓄積
2. **冷却原子**: 速度分布を狭め、波長を揃えてコヒーレンスを確保
3. **原子干渉計**: ラマン遷移で経路を分岐、加速度を位相差として検出
4. **量子航法**: 3軸展開でドリフトの小さい**GNSSフリー航法**が可能に

原子(プランク定数: \hbar)と光(光速: c)という**自然の基本定数**を基準にすることで、人工物の限界を超える

LT登壇者の募集

- 物理学集会ではLT登壇者を募集しています！
 - どんなジャンルでもOK！
- 興味のある方は物理学集会のDiscordサーバーまで！

