

Chern-Simons重力 における量子干渉効果

“Daily and seasonal variations in quantum interference induced by Chern-Simons gravity” (in prep.) H. Okawara, K Yamada, and H Asada

弘前大学大学院 理工学研究科

大河原広樹



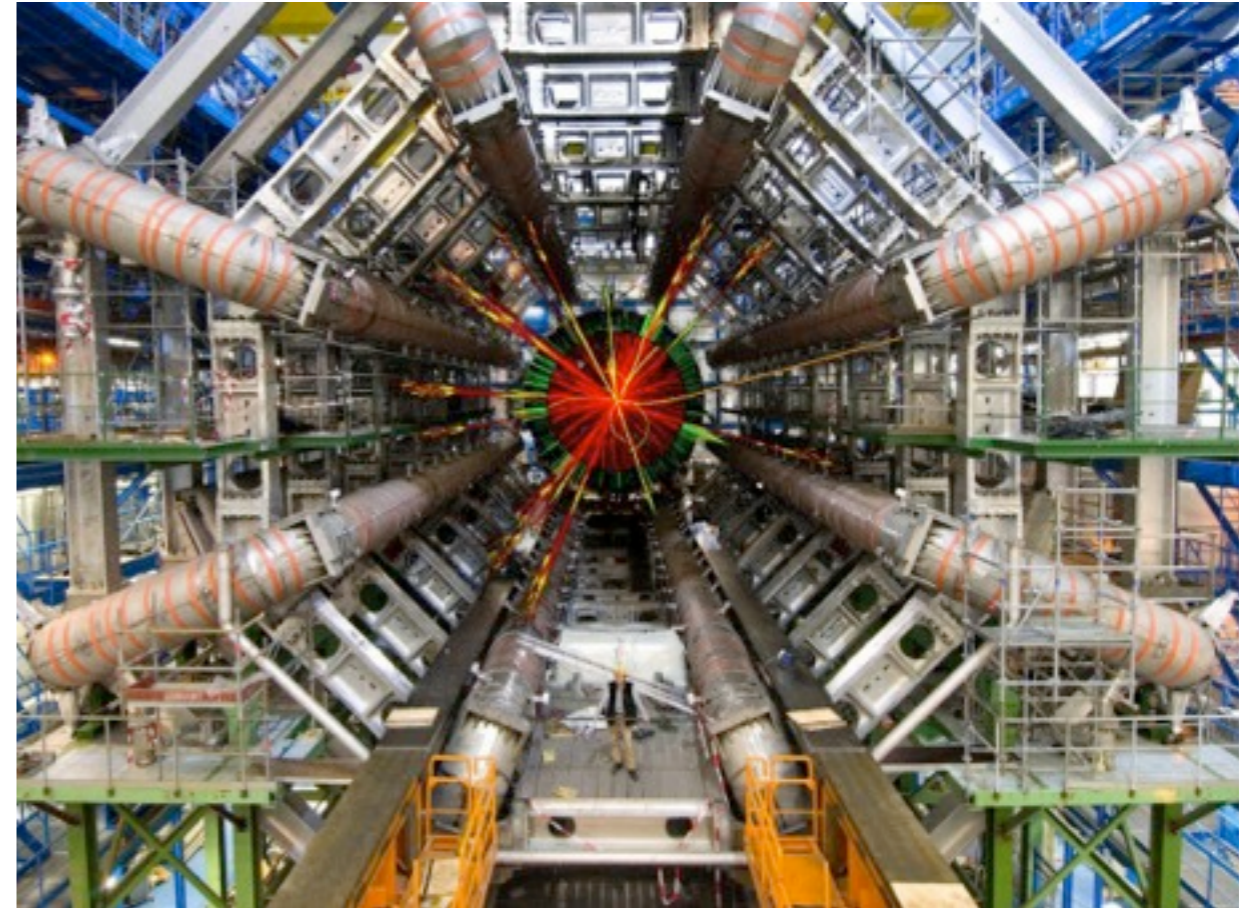
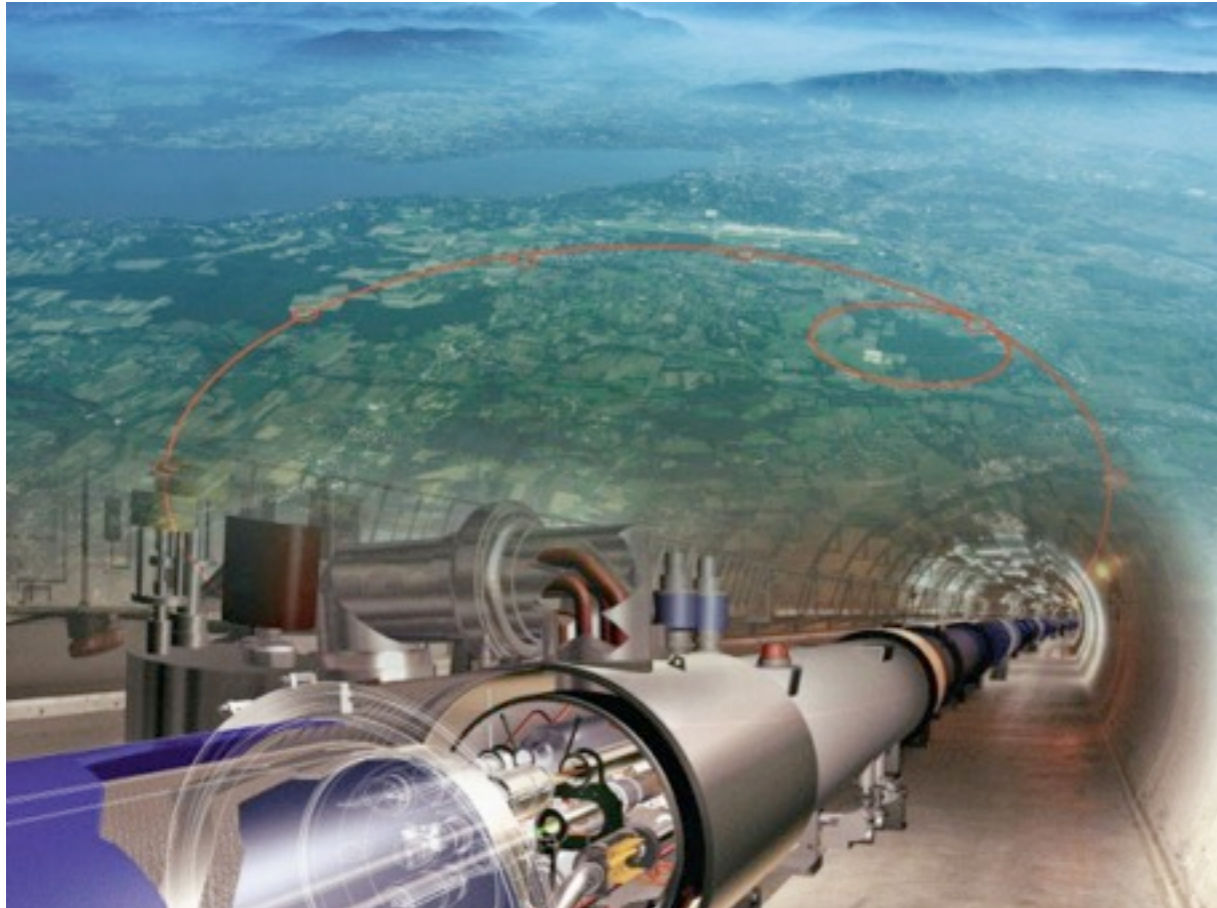
共同研究者：山田慧生, 浅田秀樹

もくじ

- はじめに、背景
- 量子干渉実験 (中性子干渉計を用いた量子干渉効果)
- Chern-Simons(CS)重力、CS重力による位相差
- 時間変化 (日変化、年変化)
- \dot{f} への制限
- まとめ、課題

大型ハドロン衝突型加速器(LHC)

Large Hadron Collider [写真は日経新聞より]



- 高エネルギー物理実験を目的としてCERNが建設した衝突型円型加速器
- ATLASとCMSのヒッグス粒子発見により標準理論の完成
- 陽子が衝突したときのエネルギー → TeVのエネルギーレベルで頭打ち？

これからは非加速器実験が重要！

もくじ

- はじめに、背景
- 量子干渉実験 (中性子干渉計を用いた量子干渉効果)
- Chern-Simons(CS)重力、CS重力による位相差
- 時間変化 (日変化、年変化)
- \dot{f} への制限
- まとめ、課題

量子干渉実験

中性子干渉計を用いた量子干渉効果

- 非加速器実験
- COW実験(重力の量子力学的効果の測定)

極冷中性子大型干渉計で、大型化・測定精度の向上で、より精密な重力理論の検証が可能！

————→ 一般相対論、修正重力理論

Chern-Simons(CS)重力

量子干渉実験

中性子干渉計を用いた量子干渉効果

“Observation of Gravitationally Induced Quantum Interference”

PRL **34**,1472(1975)

R. Colella, A. W. Overhauser and S. A. Werner

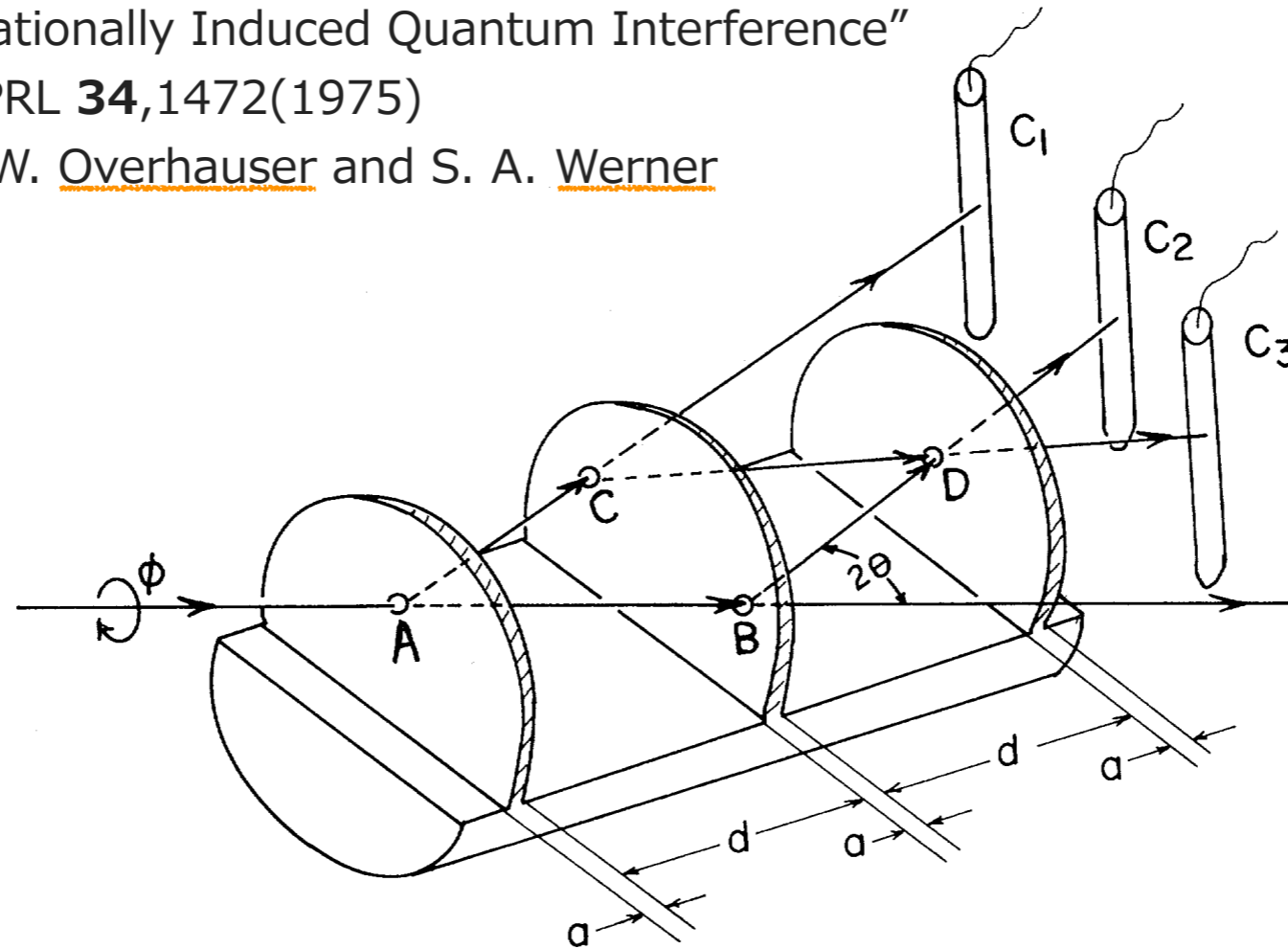


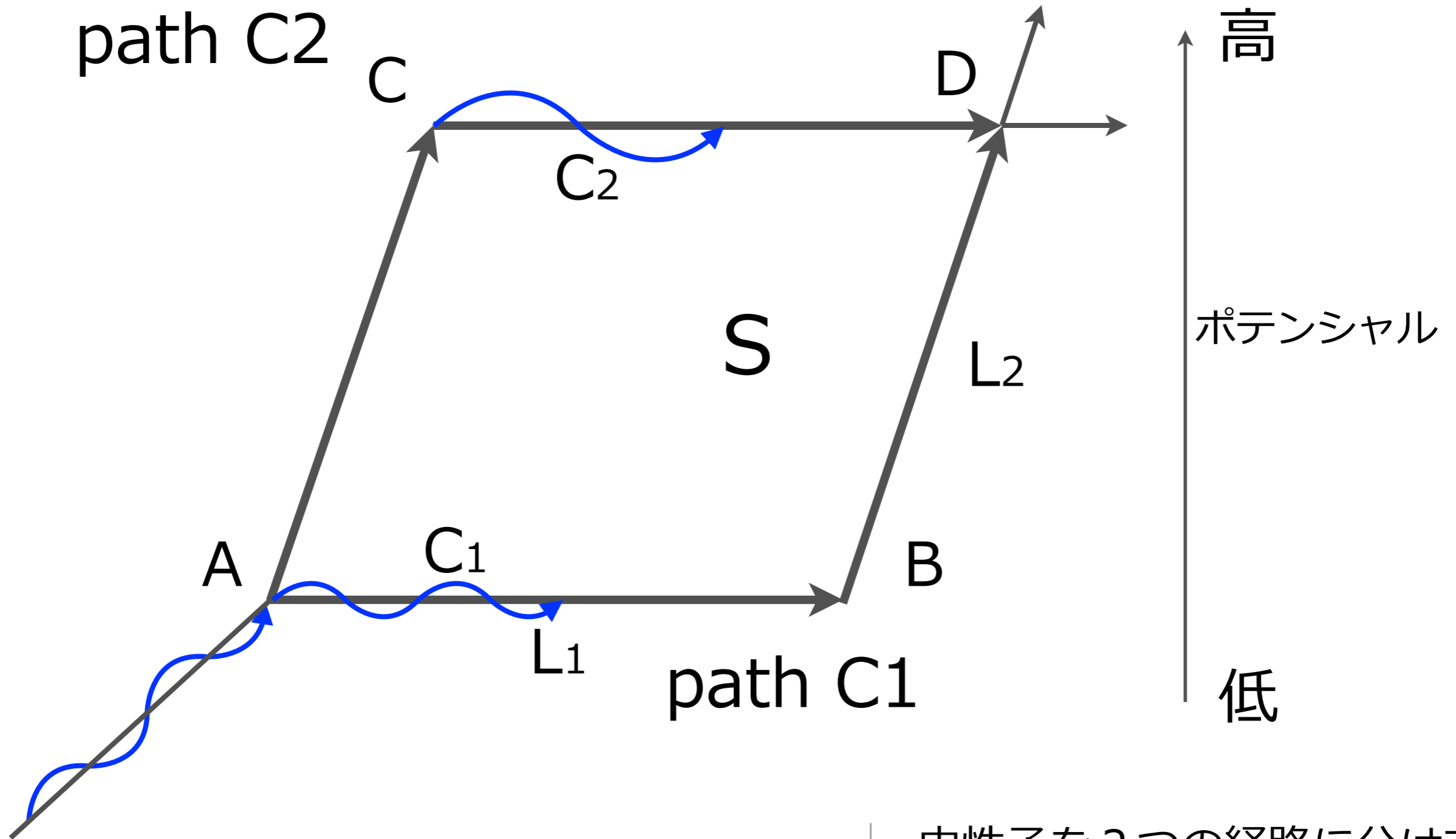
FIG. 1. Schematic diagram of the neutron interferometer and ³He detectors used in this experiment.

COW実験(中性子干渉計)

中性子を2つの経路に分けて、経路間の位相差の変化を干渉縞として測定する実験。

量子干渉実験

中性子干渉計を用いた量子干渉効果



COW実験(中性子干渉計)

中性子を2つの経路に分けて、経路間の位相差の変化を干渉縞として測定する実験。

量子干渉実験

中性子干渉計を用いた量子干渉効果

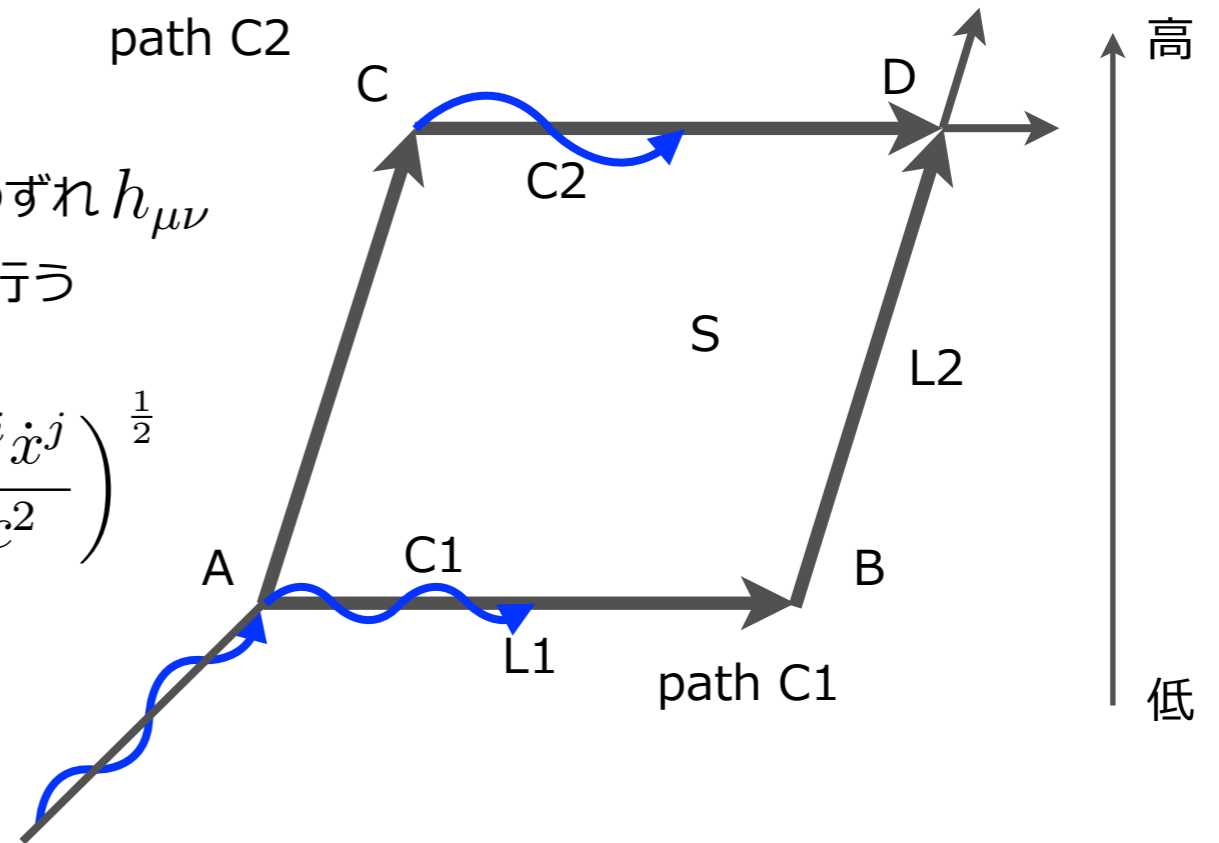
- ラグランジアン L [$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$]

重力場中の粒子を m とし、

平坦時空からのずれ $h_{\mu\nu}$

h について 1 次のオーダーまでとり、 $v \ll c$ の近似を行う

$$L = -mc^2 \left(1 + h_{00} + 2h_{0i} \frac{\dot{x}^i}{c} - \frac{(\dot{x}^i)^2}{c^2} + h_{ij} \frac{\dot{x}^i \dot{x}^j}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$\simeq -mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} h_{00} + h_{0i} \frac{\dot{x}^i}{c} - \frac{(\dot{x}^i)^2}{2c^2} \right)$$



- ハミルトニアン H

$$H = mc^2 + \frac{1}{2m} (\vec{p} + m\vec{c}\vec{h}_0)^2 + \frac{1}{2} mc^2 h_{00}$$

- シュレディンガー方程式

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \left(\frac{1}{2m} (\vec{p} + m\vec{c}\vec{h}_0)^2 + \frac{1}{2} mc^2 h_{00} \right) \psi$$

量子干渉実験

中性子干渉計を用いた量子干渉効果

- シュレディンガー方程式

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \left(\frac{1}{2m} (\vec{p} + m\vec{c}\vec{h}_0)^2 + \frac{1}{2} mc^2 h_{00} \right) \psi$$

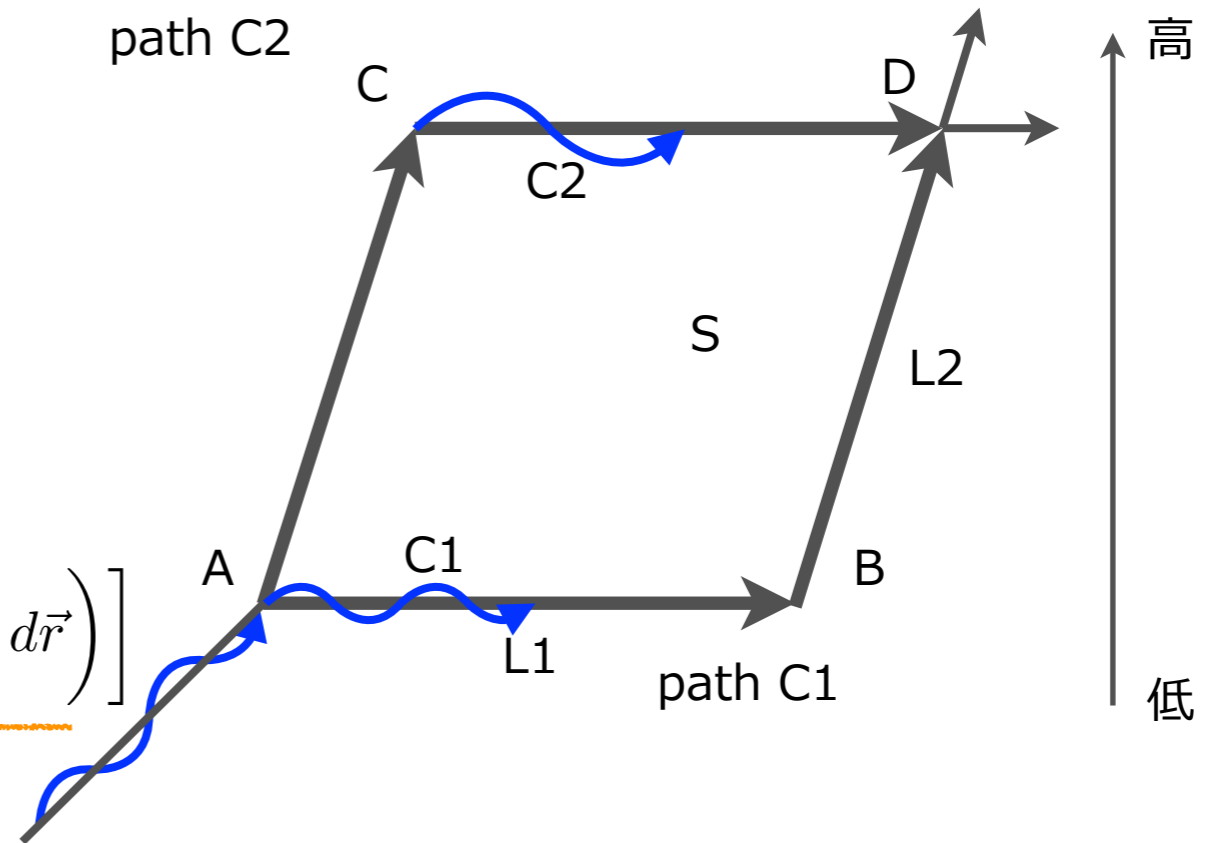
- 波動関数

$$\psi = \psi_0 \exp \left[\left(-i \frac{mc^2}{2\hbar} \int h_{00} dt \right) + \left(-i \frac{mc}{\hbar} \int \vec{h}_0 \cdot d\vec{r} \right) \right]$$

- 位相差

$$\Delta = \frac{mc}{\hbar} \left(\int_{\text{path } ACD} \vec{h}_0 \cdot d\vec{r} - \int_{\text{path } ABD} \vec{h}_0 \cdot d\vec{r} \right) = \frac{mc}{\hbar} \oint_C \vec{h}_0 \cdot d\vec{r}$$

$$= \frac{mc}{\hbar} \int_S (\vec{\nabla} \times \vec{h}_0) \cdot d\vec{S}$$



もくじ

- はじめに、背景
- 量子干渉実験 (中性子干渉計を用いた量子干渉効果)
- Chern-Simons(CS)重力、CS重力による位相差
- 時間変化 (日変化、年変化)
- \dot{f} への制限
- まとめ、課題

Chern-Simons(CS)重力

“New Post-Newtonian Parameter to Test Chern-Simons Gravity”

PRL **99**,241101(2007)

Stephon Alexander and Nicolas Yunes

- CSによる作用積分

$$S_{CS} = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \frac{1}{4} f R^* R$$

- CS補正の計量

$$g_{00} = -1 + 2U - 2U^2 + 4\Phi_1 + 4\Phi_2 + 2\Phi_3 + 6\Phi_4 + \mathcal{O}(6),$$

$$g_{0i} = -\frac{7}{2}V_i - \frac{1}{2}W_i + 2\dot{f}(\nabla \times V)_i + \mathcal{O}(5),$$

- 2体や多体系で使える

$$g_{ij} = (1 + 2U)\delta_{ij} + \mathcal{O}(4),$$

$$\delta g_{0i} = 2 \sum_A \dot{f} \left[\frac{m_A}{r_A} (\mathbf{v}_A \times \mathbf{n}_A)^i - \frac{J_A^i}{2r_A^2} + \frac{3}{2} \frac{(J_A \cdot \mathbf{n}_A)}{r_A^2} n_A^i \right]$$

$$\Omega^i = (\vec{\nabla} \times \mathbf{g})^i$$

位相差

$$\Delta = \frac{mc}{\hbar} \int_S (\vec{\nabla} \times \vec{h}_0) \cdot d\vec{S}$$

$$\delta \Omega^i = 2 \sum_A \dot{f} \frac{m_A}{r_A^3} [3(\mathbf{v}_A \cdot \mathbf{n}_A) n_A^i - v_A^i]$$

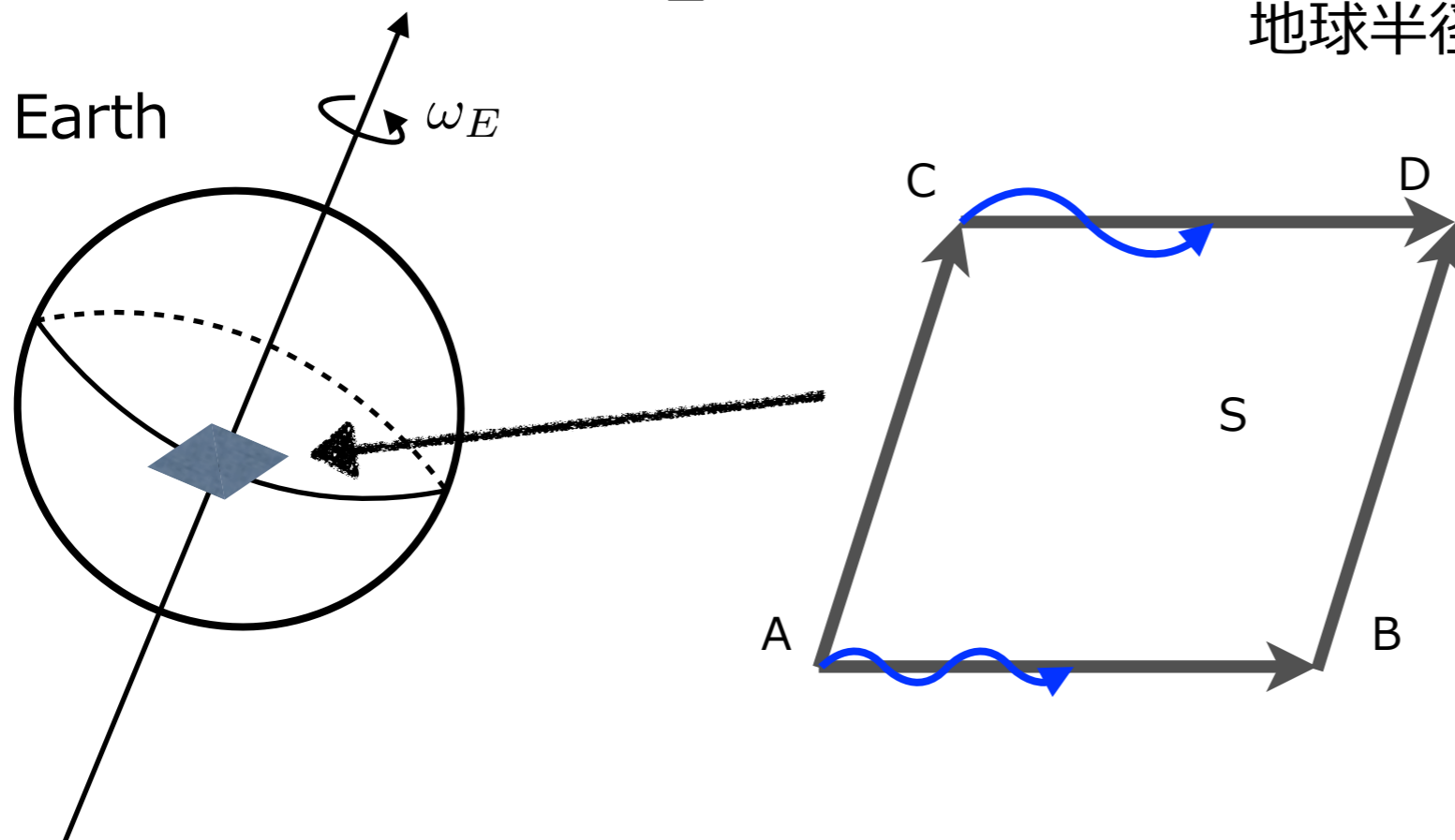
CS重力による位相差

“Daily and seasonal variations in quantum interference induced by Chern-Simons gravity” (in prep.) H. Okawara, K Yamada, and H Asada

- CS重力による位相差

$$\begin{aligned}\Delta_{CS} &= \frac{2m}{\hbar c^2} \int_S f \frac{GM_E}{r^3} [3(\vec{v}_E \cdot \vec{n}_E)\vec{n}_E - \vec{v}_E] \cdot \vec{N}_I dS \\ &= 2f \frac{mGM_E S}{\hbar c^2 r_E^3} [3(\vec{v}_E \cdot \vec{n}_E)\vec{n}_E - \vec{v}_E] \cdot \vec{N}_I\end{aligned}$$

地球半径 $\gg \sqrt{s}$ (干渉計の大きさS)

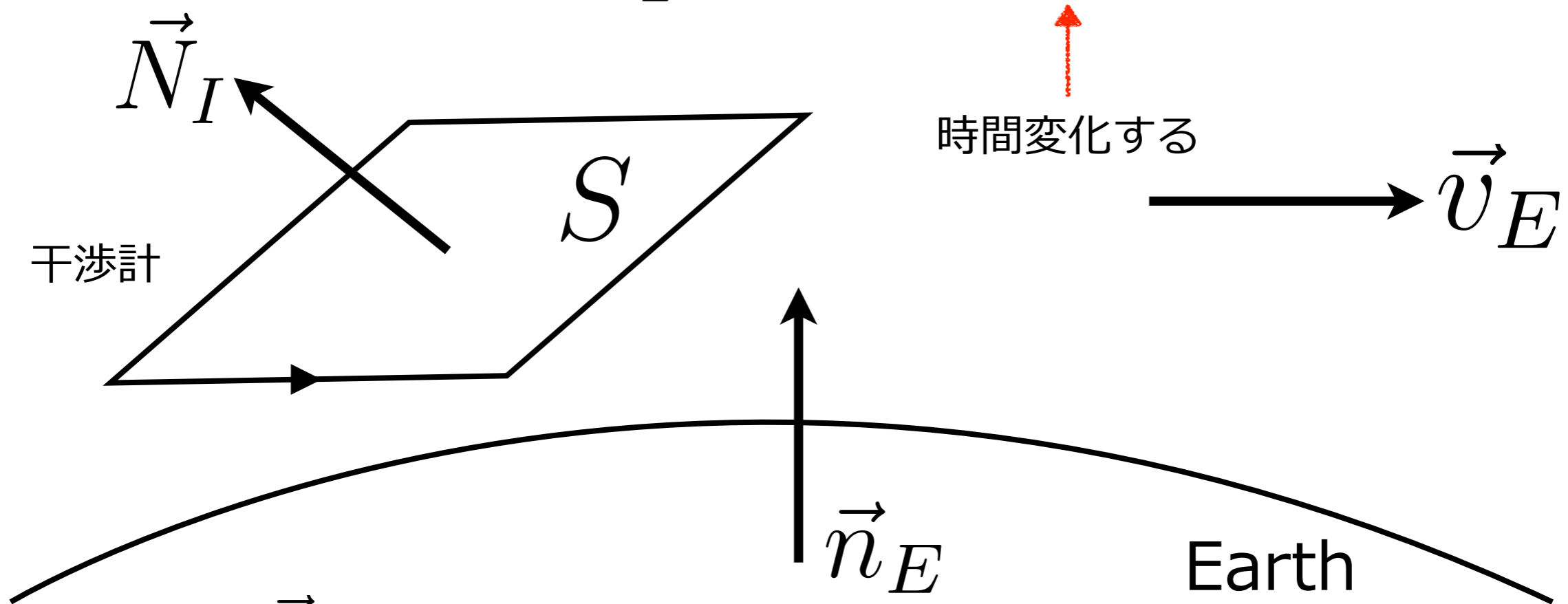


CS重力による位相差

“Daily and seasonal variations in quantum interference induced by Chern-Simons gravity” (in prep.) H. Okawara, K Yamada, and H Asada

- CS重力による位相差

$$\Delta_{CS} = 2f \frac{mGM_E S}{\hbar c^2 r_E^3} \underbrace{[3(\vec{v}_E \cdot \vec{n}_E)\vec{n}_E - \vec{v}_E]}_{\text{時間変化する}} \cdot \vec{N}_I$$



\vec{v}_E : 地球の公転速度ベクトル

\vec{n}_E : 干渉計の置く位置における鉛直ベクトル

\vec{N}_I : 干渉計表面における法線ベクトル

もくじ

- はじめに、背景
- 量子干渉実験 (中性子干渉計を用いた量子干渉効果)
- Chern-Simons(CS)重力、CS重力による位相差
- 時間変化 (日変化、年変化)
- \dot{f} への制限
- まとめ、課題

Daily variation(日変化)

$$[3(\vec{v}_E \cdot \vec{n}_E)\vec{n}_E - \vec{v}_E] \cdot \vec{N}_I = 3(\vec{v}_E \cdot \vec{n}_E)(\vec{n}_E \cdot \vec{N}_I) - \vec{v}_E \cdot \vec{N}_I$$

$$= \vec{v}_E \cdot [3(\vec{n}_E \cdot \vec{N}_I)\vec{n}_E - \vec{N}_I]$$

$$= (\vec{v}_E)^T [3(\vec{n}_E \cdot \vec{N}_I)R(t)\vec{n}_{E0} - R(t)\vec{N}_{I0}]$$

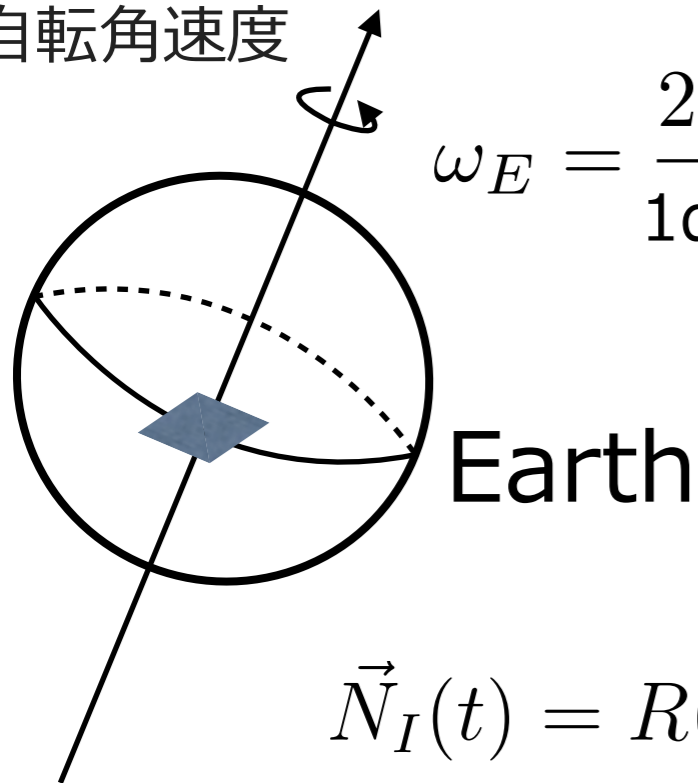
$$= (\vec{v}_E)^T R(t) [3(\vec{n}_{E0} \cdot \vec{N}_{I0})\vec{n}_{E0} - \vec{N}_{I0}]$$

初期位置で決まる

$t = 0$ は太陽座標系での真夜中・冬至

自転角速度

$$\omega_E = \frac{2\pi}{1\text{day}}$$



$$\vec{N}_I(t) = R(t)\vec{N}_{I0}$$

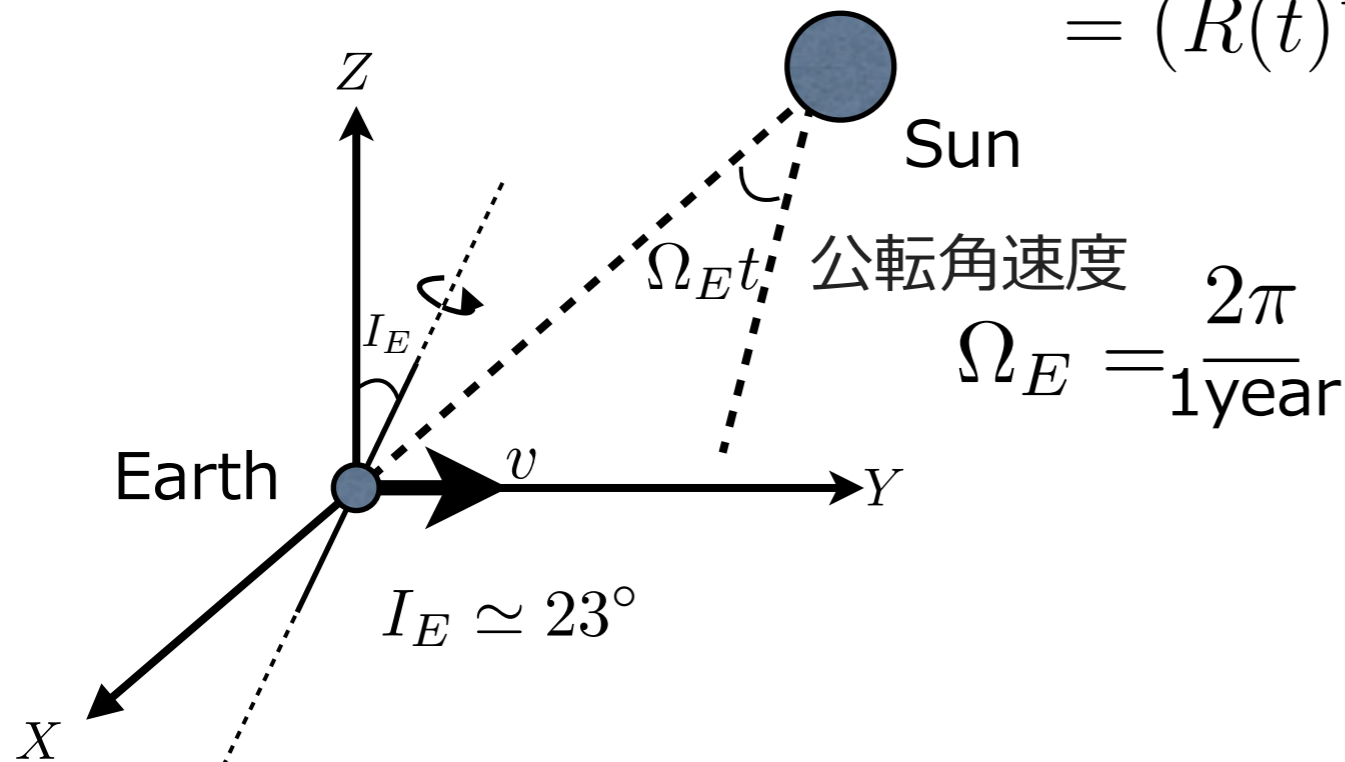
$$\vec{n}_E(t) = R(t)\vec{n}_{E0}$$

$$R(t) = \begin{pmatrix} \cos(\omega_E t) & -\sin(\omega_E t) & 0 \\ \sin(\omega_E t) & \cos(\omega_E t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Seasonal variation(年変化)

$$[3(\vec{v}_E \cdot \vec{n}_E)\vec{n}_E - \vec{v}_E] \cdot \vec{N}_I = (\vec{v}_E)^T R(t) [3(\vec{n}_{E0} \cdot \vec{N}_{I0})\vec{n}_{E0} - \vec{N}_{I0}]$$

$$= (R(t)^{-1} \vec{v}_E)^T [3(\vec{n}_{E0} \cdot \vec{N}_{I0})\vec{n}_{E0} - \vec{N}_{I0}]$$



座標と成分の回転を与える

$$\Delta_{CS} = 2f \frac{mGM_E S}{\hbar c^2 r_E^3} (R^{-1} \vec{v}_E)^T [3(\vec{n}_{E0} \cdot \vec{N}_{I0})\vec{n}_{E0} - \vec{N}_{I0}]$$

$$(R^{-1} \vec{v}_E)^T = \left(\{R(\omega_E)\}^{-1} \{R(\Omega_E)\}^{-1} R(I) R(\Omega_E) \begin{pmatrix} v_E \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right)^T$$

$$\Delta_{CS} = 2f \frac{mGM_E S}{\hbar c^2 r_E^3} (R^{-1} \vec{v}_E)^T \left[3(\vec{n}_{E0} \cdot \vec{N}_{I0}) \vec{n}_{E0} - \vec{N}_{I0} \right]$$

$$(R^{-1} \vec{v}_E)^T = \left(\{R(\omega_E)\}^{-1} \{R(\Omega_E)\}^{-1} R(I) R(\Omega_E) \begin{pmatrix} v_E \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right)^T$$

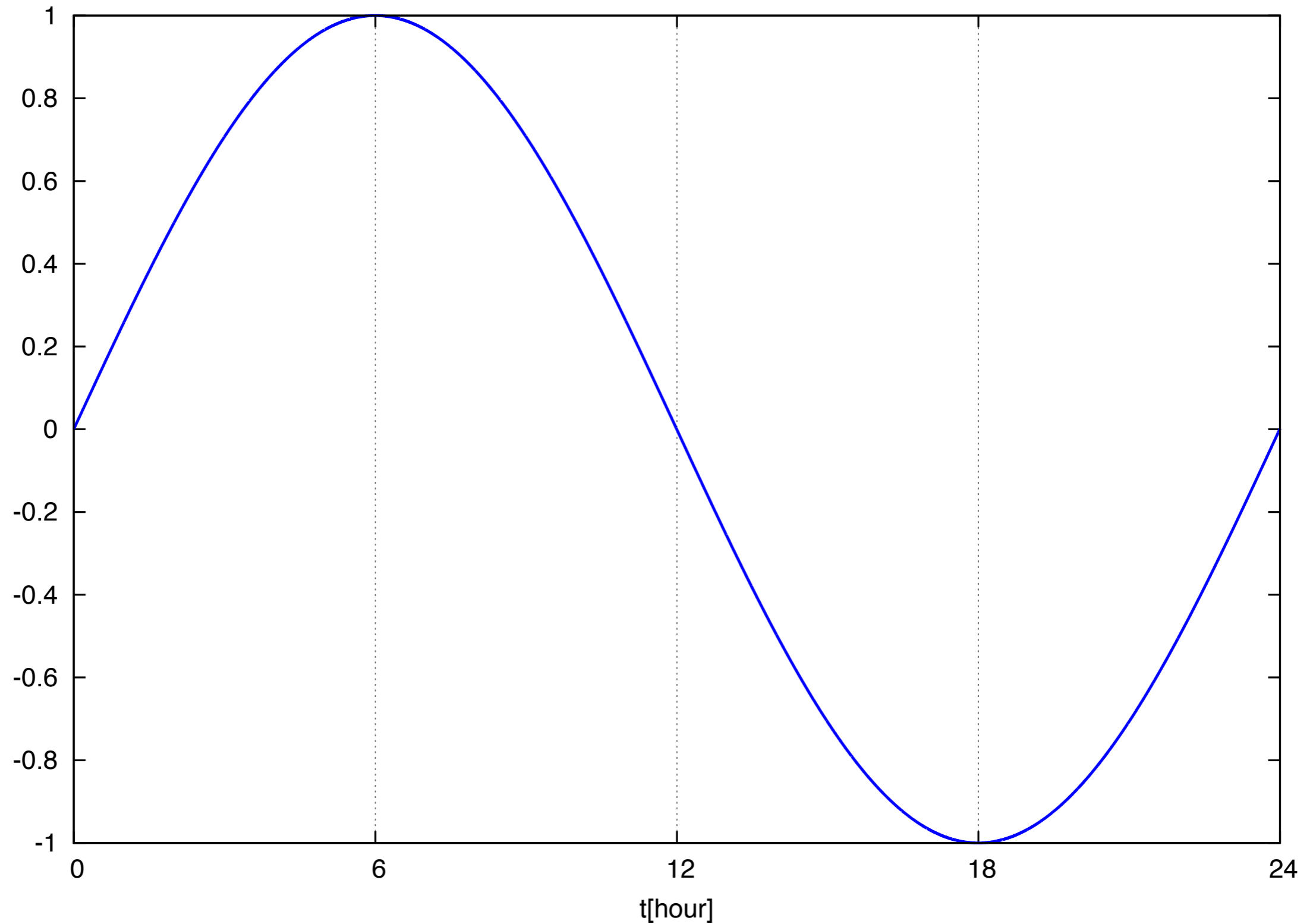
$$\begin{array}{l} \text{自転} \\ R(\omega_E) = \begin{pmatrix} \cos(\omega_{Et}) & -\sin(\omega_{Et}) & 0 \\ \sin(\omega_{Et}) & \cos(\omega_{Et}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{l} \text{公転} \\ R(\Omega_E) = \begin{pmatrix} \cos(\Omega_{Et}) & -\sin(\Omega_{Et}) & 0 \\ \sin(\Omega_{Et}) & \cos(\Omega_{Et}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{l} \text{地軸の傾き} \\ R(I_E) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(I_E) & -\sin(I_E) \\ 0 & \sin(I_E) & \cos(I_E) \end{pmatrix} \end{array}$$

$$\begin{aligned} (R^{-1} \vec{v}_E)_x &= [\sin^2(\Omega_{Et}) \cos(I_E) + \cos^2(\Omega_{Et})] \cos(\omega_{Et}) \\ &\quad - [\sin(\Omega_{Et}) \cos(\Omega_{Et}) (1 - \cos(I_E))] \sin(\omega_{Et}) \end{aligned}$$

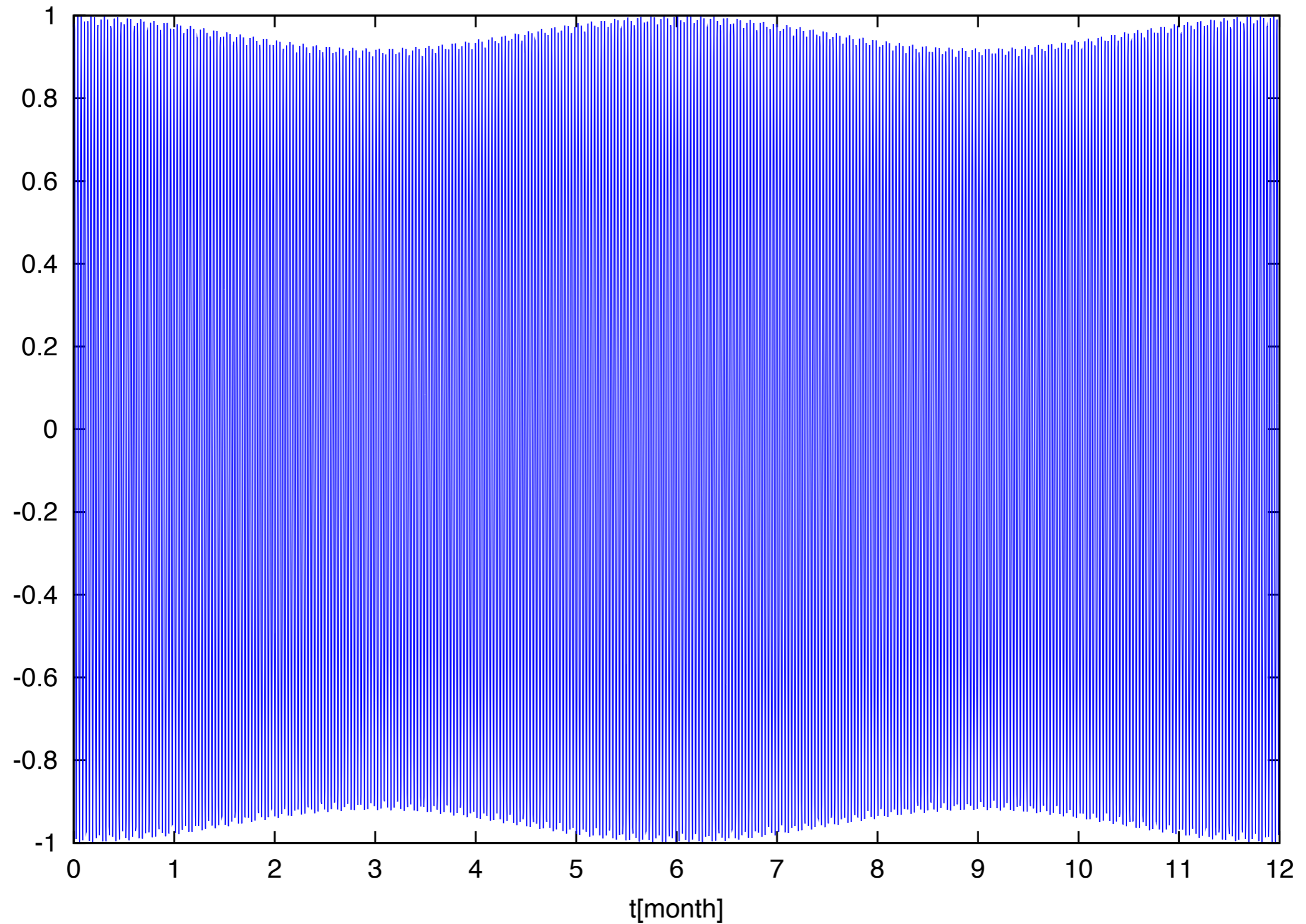
$$\begin{aligned} (R^{-1} \vec{v}_E)_y &= -[\sin^2(\Omega_{Et}) \cos(I_E) + \cos^2(\Omega_{Et})] \sin(\omega_{Et}) \\ &\quad - [\sin(\Omega_{Et}) \cos(\Omega_{Et}) (1 - \cos(I_E))] \cos(\omega_{Et}) \end{aligned}$$

$$(R^{-1} \vec{v}_E)_z = \sin(\Omega_{Et}) \sin(I_E)$$

Daily variation(日変化)



Seasonal variation(年変化)



もくじ

- はじめに、背景
- 量子干渉実験 (中性子干渉計を用いた量子干渉効果)
- Chern-Simons(CS)重力、CS重力による位相差
- 時間変化 (日変化、年変化)
- f への制限
- まとめ、課題

\dot{f} への制限

- \dot{f} と位相差のオーダー

$$|\Delta_{CS}| \sim 4 \left(\frac{mc^2}{\hbar} \right) \left(\frac{\dot{f}}{c} \frac{GM_E}{c^2 r_E} \frac{v_E}{c} \right) \left(\frac{S}{r_E^2} \right)$$

重力による効果

量子力学的効果

$$\sim 10^{-3} [s^{-1}] \times \left(\frac{mc^2}{1\text{GeV}} \right) \left(\frac{\dot{f}}{c} \right) \left(\frac{S}{0.4\text{m}^2} \right)$$

測定精度 $O(10^{-3})$ でCS重力は $\dot{f}c^{-1} < 10^0 s$ の制限を与える

3桁! ?

- GPB(Gravity Probe B), LAGEOSによる古典力学的実験は $\dot{f}c^{-1} < 10^{-3} s$ の制限

"New Post-Newtonian Parameter to Test Chern-Simons Gravity"

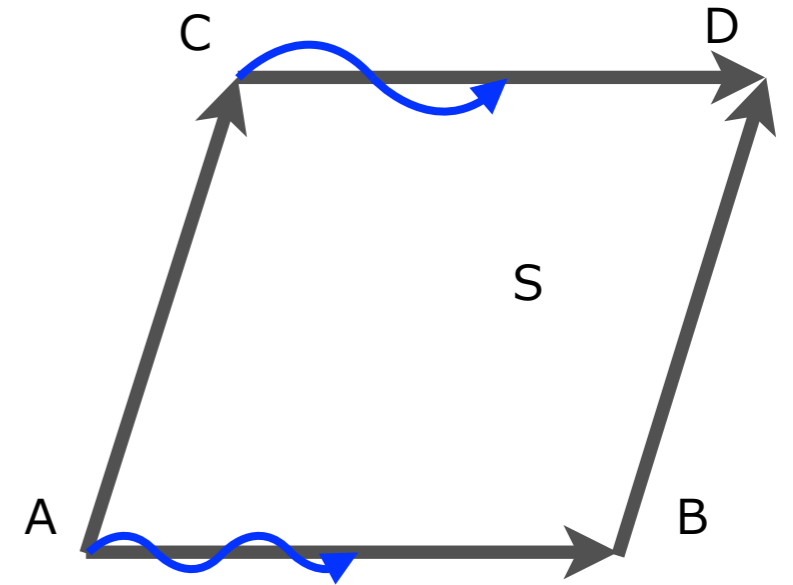
PRL **99**,241101(2007)

Stephon Alexander and Nicolas Yunes

\dot{f} への制限

$$|\Delta_{CS}| \sim 10^{-3} [s^{-1}] \times \left(\frac{mc^2}{1\text{GeV}} \right) \left(\frac{\dot{f}}{c} \right) \left(\frac{S}{0.4\text{m}^2} \right)$$

- 干渉計の腕の長さを 0.6m \rightarrow 5m で面積 2桁向上
- 位相差測定精度を $O(10^{-3})$ から $O(10^{-4})$ へ 1桁向上



- 将来的に $\dot{f}c^{-1} < 10^0 s$ \longrightarrow $\dot{f}c^{-1} < 10^{-3} s$ の制限!

- GPB(Gravity Probe B), LAGEOSによる古典力学的実験は $\dot{f}c^{-1} < 10^{-3} s$ の制限

"New Post-Newtonian Parameter to Test Chern-Simons Gravity"

PRL **99**,241101(2007)

Stephon Alexander and Nicolas Yunes

もくじ

- はじめに、背景
- 量子干渉実験 (中性子干渉計を用いた量子干渉効果)
- Chern-Simons(CS)重力、CS重力による位相差
- 時間変化 (日変化、年変化)
- \dot{f} への制限
- まとめ、課題

まとめ

- まとめ

- 中性子干渉計を用いた量子干渉効果を利用して、CS重力へ制限を与えられる

- 干渉効果は時間変化する（日変化、年変化）

- 将来的に $\dot{f}c^{-1} < 10^0 s$ \longrightarrow $\dot{f}c^{-1} < 10^{-3} s$ の制限

- 課題

- 地球半径 $\gg \sqrt{s}$ (干渉計の大きさS) の近似が使えない場合

eLISA, DECIGO etc.