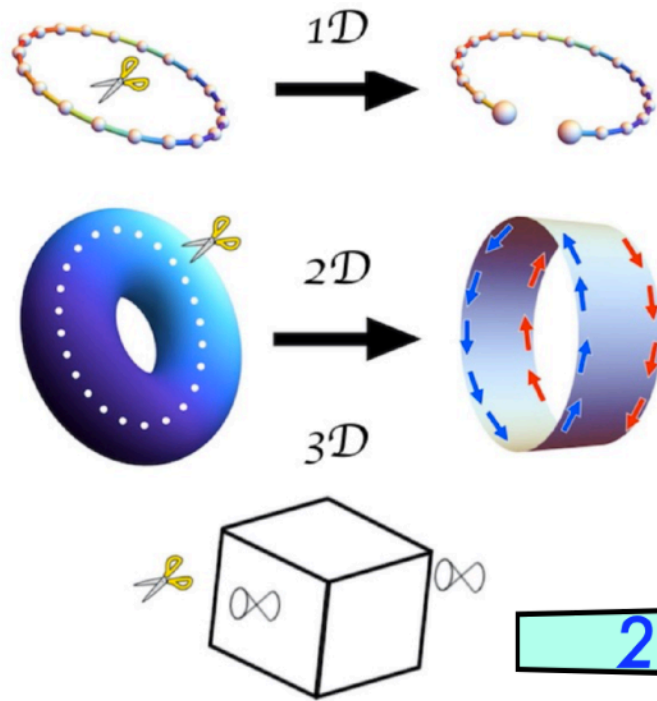


Welcome !

8th-informal workshop

2017	2018	2019	2020	2021
------	------	------	------	------

"Variety and universality of Bulk-Edge Correspondence in topological phases:

From solid state physics to trans-disciplinary concepts"

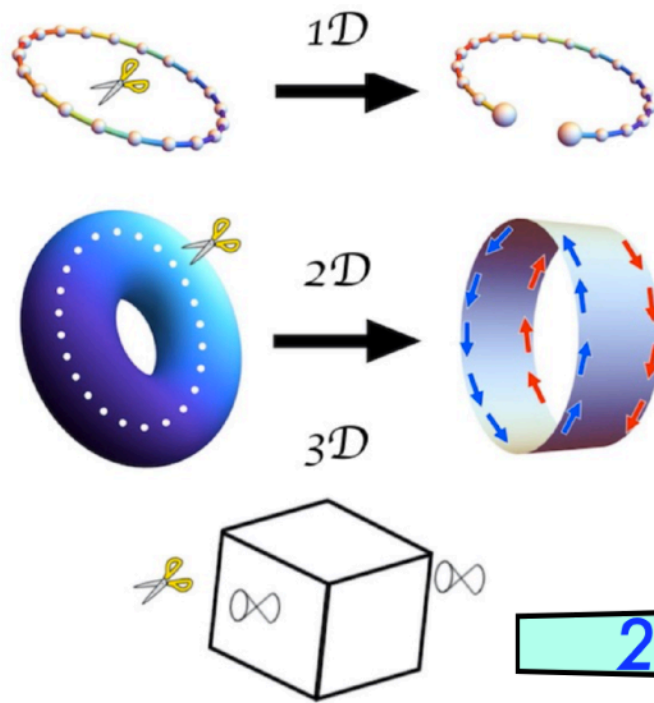
トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性

固体物理を越えて分野横断へ

Yasuhiro Hatsugai

Department of Physics

University of Tsukuba



"Variety and universality of **Bulk-Edge** Correspondence in topological phases:
From solid state physics to trans-disciplinary concepts"

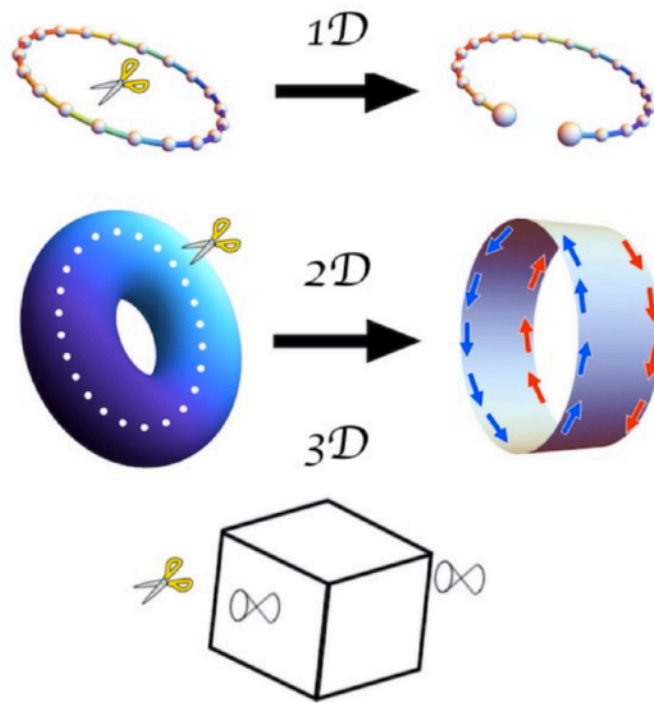


Science of **Bulk-Edge** Correspondence

Yasuhiro Hatsugai

Department of Physics
University of Tsukuba





“Variety and universality of **Bulk-Edge** Correspondence in topological phases:
From solid state physics to trans-disciplinary concepts”

Grant-in-Aid for Scientific Research (S) Project No.17H06138

トポロジカル相でのバルク□エッジ対応の多様性と普遍性
固体物理を越えて分野横断へ



① バルクエッジ対応の科学

2017	2018	2019	2020	2021	(年度)
------	------	------	------	------	------

② 本科研に関する筑波大学の成果の幾つか (2020)

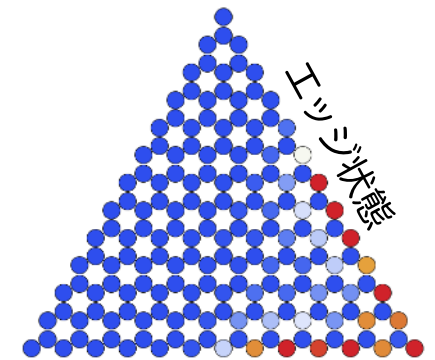
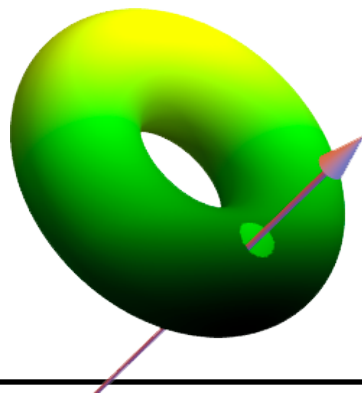
初貝 安弘 (筑波大学)



トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性

固体物理を越えて分野横断へ

ヒアリング



2017年度～2021年度 (5年間)

研究代表者 代
研究分担者 分

筑波大学
京都大学
広島大学
茨城大学
東邦大学
東京大学



初貝 安弘
高橋 義朗
木村 昭夫
福井 隆裕
河原林 透
青木 秀夫

物性理論
冷却原子実験
放射光ARPES実験
物性理論 (場の理論)
物性理論 (数値的研究)
物性理論 (電子相関)

連携研究者 連

東京大学
東京大学
京都大学
京都大学
広島大学

古田 幹雄
岩本 敏
小林 淳
中島 秀太
井村 健一郎

低次元位相幾何学
光エレクトロニクス
冷却原子実験
冷却原子実験
物性理論
(トポロジカル絶縁体)

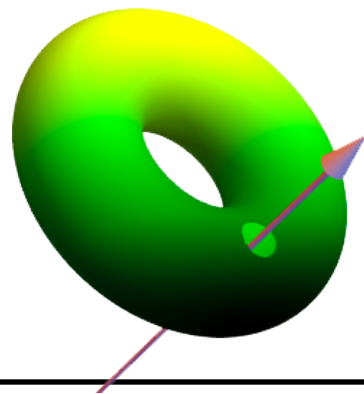
物質材料機構

苅宿俊風

物性理論 (古典力学)

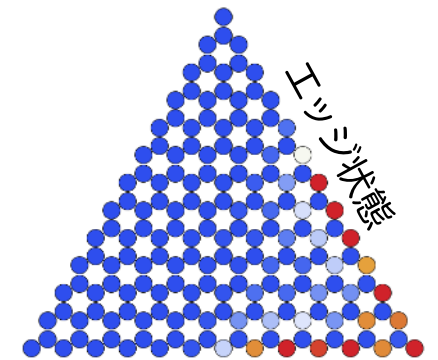
2017 2018 2019 2020 2021

トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性



固体物理を越えて分野横断へ

スタートアップ研究会



2017年度～2021年度 (5年間)

研究代表者 代
研究分担者 分

筑波大学
京都大学
広島大学
茨城大学
東邦大学
東京大学
東京大学



初貝 安弘
高橋 義朗
木村 昭夫
福井 隆裕
河原林 透
青木 秀夫
岩本 敏

物性理論
冷却原子実験
放射光ARPES実験
物性理論 (場の理論)
物性理論 (数値的研究)
物性理論 (電子相関)
光エレクトロニクス

連携研究者 連

東京大学
京都大学
京都大学
広島大学
物質材料機構

古田 幹雄
小林 淳
中島 秀太
井村 健一郎
苅宿俊風

低次元位相幾何学
冷却原子実験
冷却原子実験
物性理論
(トポロジカル絶縁体)
物性理論 (古典力学)

2017 2018 2019 2020 2021

研究目的

バルク・エッジ対応

ヒアリング

代 初貝が24年前に提唱 Y. Hatsugai, Phys. Rev. Lett. 71, 3697 (1993)

若手研究者3名雇用

展開

1992年奨励研究(A)
「電子系スピン系におけるトポロジカル効果」
の成果

助教 A

2014.4~2017.3

助教 B

井村

研究 (A)

助教 C

冷却原子実験

トポロジカル相

放射光ARPES実験

高橋 小林 中島 大学院

木村 大学院学生

大学院学生
フォノニック
初貝
古典振動子系

基盤研究(S)後の
将来の展望

井村
数学 現象を基に異分野交流
展開を目指す
古田 福井

連携を深化

基盤研究 (S)

分野拡大, 異分野融合へ

2017.4 - 2022.3

多様性の確認から普遍性の確立へ 研究代表と研究分担者, 連携, 新規雇用を含めて展開を目指す

バルク・エッジ対応の科学

高橋

木村

社会還元
冷却原子"実験"班

福井 (革新的)

術への展開

放射光ARPES"実験"班 (東大生研)
エッジ状態を用いた光通信

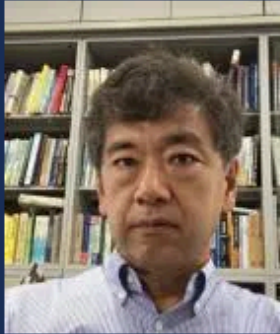
研究野の実績ある
波長効果者の集団
☆外乱に散乱されない
☆熱散逸のない電子系
☆構造力学への応用

代 初貝
"理論"班

河原林 減衰しない配線を実現

生産的な共同研究の実績

[English](#) [ホーム](#) [メンバー](#) [研究](#) [教育](#) [アウトリーチ](#) [リンク](#) [アクセス](#)



科学研究費補助金 基盤研究S: トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性: 固体物理を越えて分野横断へ

科研費
KAKENHI

科学研究費補助金 基盤研究S: トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性: 固体物理を越えて分野横断へ 研究課題番号: 17H06138 May 31, 2017 – March 31, 2022 205,140千円 (直接経費: 157,800千円、間接経費: 47,340千円) 2017年度: 45,370千円 (直接経費: 34,900千円、間接経費: 10,470千円) ♥ 公開情報 [採択時] [採択時審査所見] [進捗状況] [研究進捗評価] ♣ 日本学術振興会 平成29年度科学研究費助成事業 (科学研究費補助金) (基盤研究 (S)) 新規課題一覧 理工系 ♣ 科研費ニュース vol.3 (2017): 初貝安弘 「トポロジカル物質におけるバルク・エッジ対応」

Google Scholar
Web of Science
ResearcherID
Click here to see my profile
ORCID

科研費雇用研究者 (着任順)

- ◆ **溝口知成** (筑波大学数理物質系物理学域 助教): 2018年3月1日～2018年12月31日 (2019年1月1日承継梓テニユアトラック助教に配置換)
- ◆ **岩澤英明** (広島大学大学院理学研究科物理科学専攻 特定准教授): 2018年6月1日～2020年3月31日 (2020年4月1日より量子科学技術研究開発機構放射光科学研究センター主幹研究員)
- ◆ **武井宣幸** (京都大学大学院理学研究科量子光学特別講座 特定准教授): 2018年9月1日～
- ◆ **久野義人** (筑波大学数理物質系物理学域 助教): 2020年3月1日～

トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性

固体物理を越えて分野横断へ



次の展開/申請

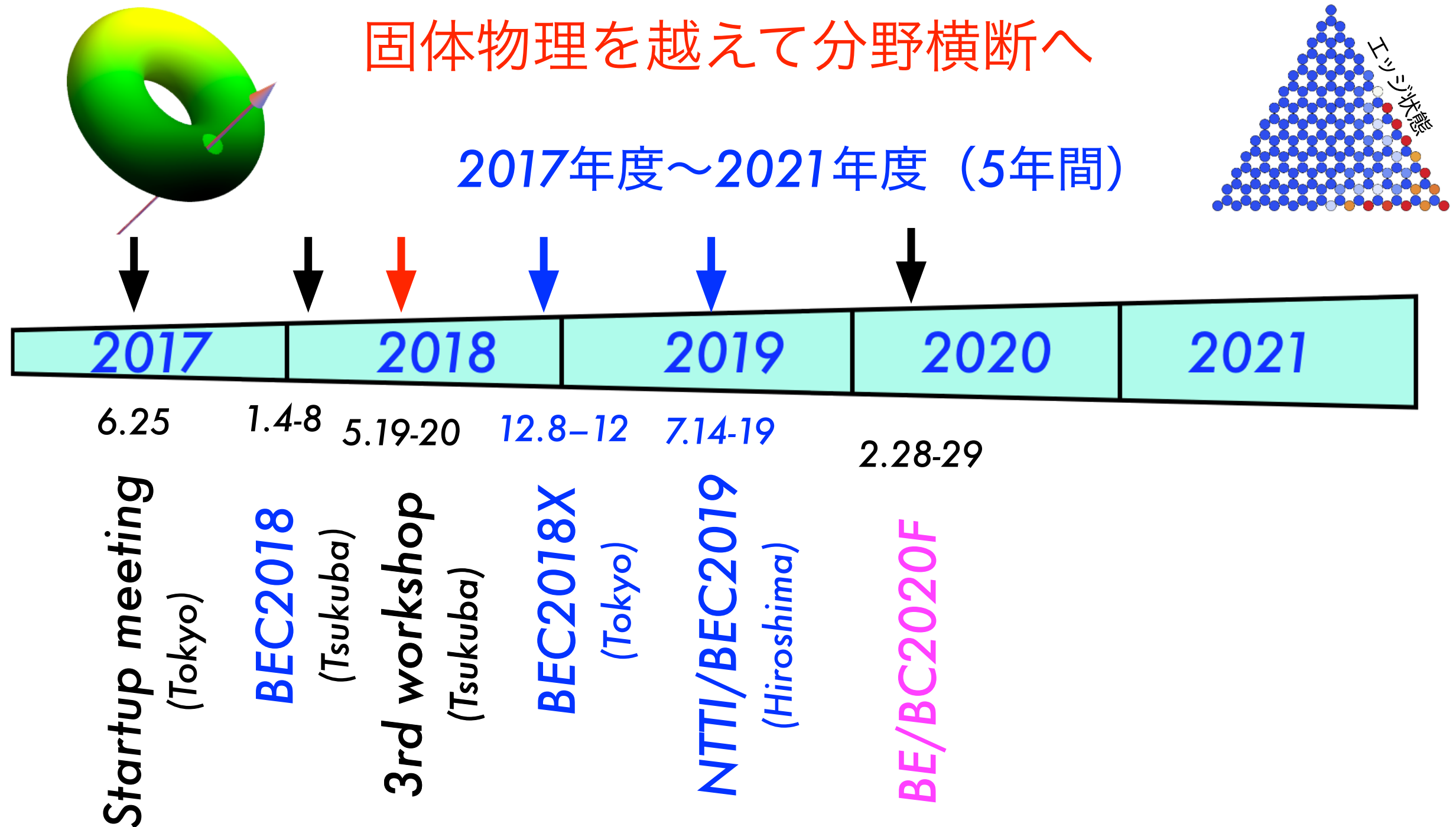


Startup (Tok
BE (T
3rd wo (Tsu
BE (Hiro
NTTI/B
6-th wo

トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性

固体物理を越えて分野横断へ

2017年度～2021年度（5年間）



トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性

固体物理を越えて分野横断へ

2017年度～2021年度（5年間）



トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性

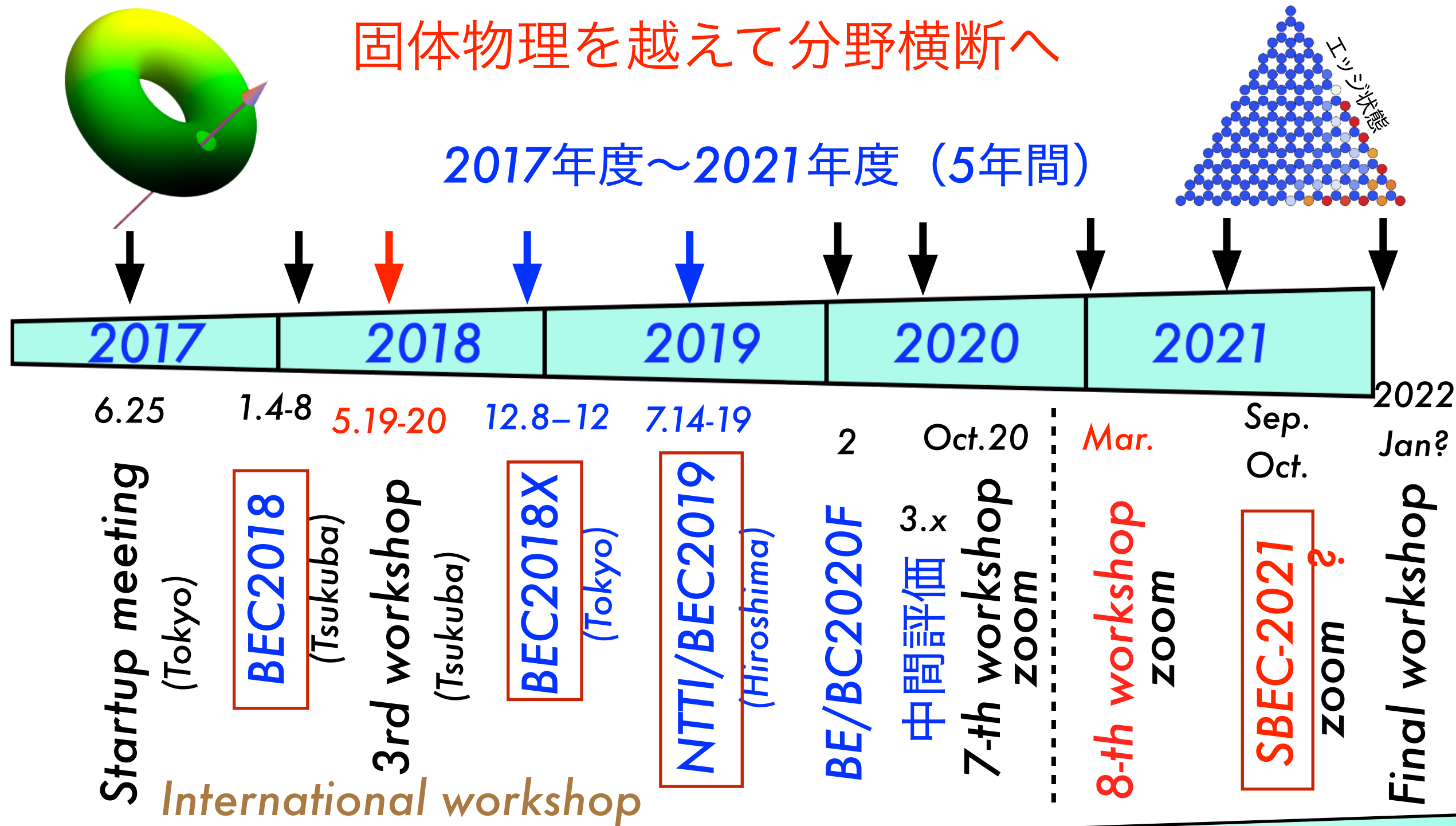
固体物理を越えて分野横断へ

2017年度～2021年度（5年間）



トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性

固体物理を越えて分野横断へ



バルクエッジ対応



「端を見て中身を考える」

「切らずに切った後を予言する」

Y. Hatsugai, Phys. Rev. Lett. 71, 3697 (1993)
Phys. Rev. B48, 11851 (1993)

$$\sigma_{xy}^{j,\text{bulk}} = -\frac{e^2}{h} [I(C_j) - I(C_{j-1})] = \sigma_{xy}^{j,\text{edge}}$$

量子ホール効果

トポロジカル相の物理の基本関係式

バルクのトポロジカル数
(見えない：直接観測できない)

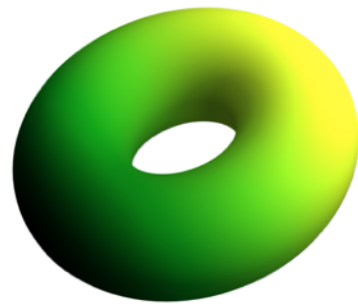
=

エッジ状態の個数 (の差)
(見える：直接観測できる)

見えないものと見えるものとの関係

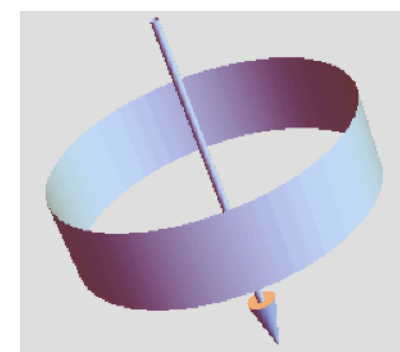
バルクエッジ対応

発想を逆にして ☒ 見える化
「エッジ状態をもつものがトポロジカル相」



BEC of IQHE YH '93

physically simple



$$\sigma_{xy}^{\text{bulk}}$$

Hall conductance of the **bulk**

=

$$\sigma_{xy}^{\text{edge}}$$

Hall conductance of the **cylinder**
(with **edges**)

Chern number

=

**Number of
edge states**

Kubo formula

Laughlin argument

Linear response

Response for infinitesimal perturbation

TKNN '82

Twisted boundary condition

Niu-Thouless-Wu '85

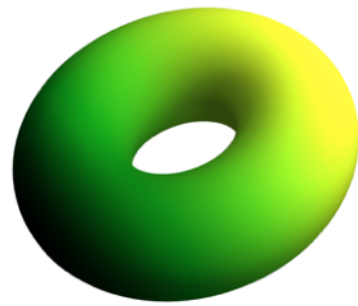
Response for **Aharonov-Bohm flux**

Laughlin '81

of edge states **Halperin '82**

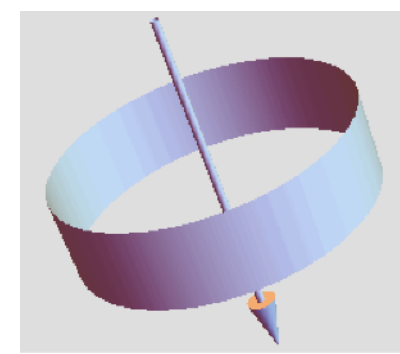
Winding number of edge states

YH '93



BEC of IQHE YH '93

physically simple



$$\sigma_{xy}^{\text{bulk}}$$

Hall conductance of the **bulk**

=

$$\sigma_{xy}^{\text{edge}}$$

Hall conductance of the **cylinder**
(with **edges**)

Chern number

=

**Number of
edge states**

Sum of TKNN integers

$$C_1 + C_2 + \cdots + C_{j-1} + C_j = I_j$$

Number of edge states

$$C_1 + C_2 + \cdots + C_{j-1} = I_{j-1}$$

winding number
of edge states

$$C_j = I_j - I_{j-1}$$

Chern number of the band

Number of the edge states

$$\sigma_{xy}^{\text{bulk}}$$

Hall conductance of the **bulk**

Kubo formula

Linear response

Response for infinitesimal perturbation

TKNN '82

???



for a gapped system

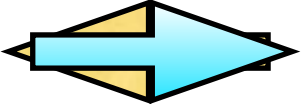
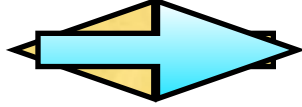
$$\sigma_{xy}^{\text{bulk}}$$

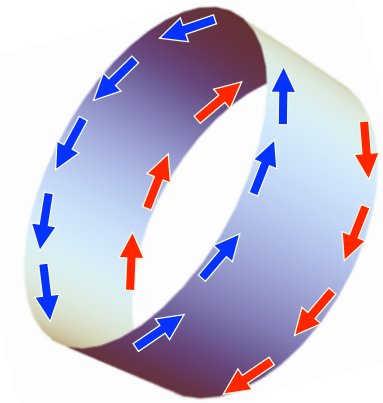
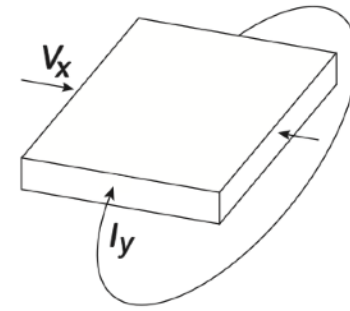
Physical observable ?

Experimental observable ?

Topology

Bulk-edge correspondence

Chern # $\sigma_{xy}^{\text{bulk}}$  $\sigma_{xy}^{\text{edge}}$  Experiments



Bulk is hidden!

Edge states exist due to topology

photonic crystals topological mechanics topological circuits
topological phononics *Equatorial waves* *Active matter*

More & more

Bulk-edge correspondence

Bulk is hidden!

Edge states exist due to topology

photonic crystals topological mechanics topological circuits
topological phononics *Equatorial waves* *Active matter*

T. Yoshida

Talk at 7-th meeting Oct.20 (2020)

Diffusion phenomena (heat conduction)

scientific reports (2021) 11:888

Tsuneya Yoshida✉ & Yasuhiro Hatsugai

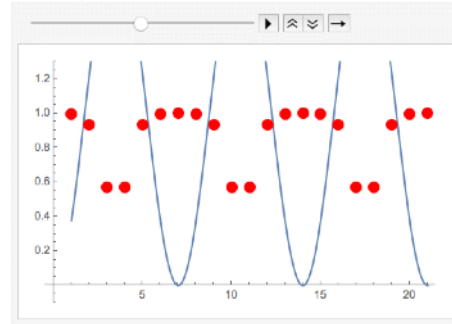
Talk in this meeting

arXiv:2012.05562 [[pdf](#), [other](#)]

Chiral edge modes in game theory: a kagome network of rock-paper-scissors

Tsuneya Yoshida, Tomonari Mizoguchi, Yasuhiro Hatsugai

Invited (short)	Tsuneya Yoshida	U. Tsukuba	Chiral edge modes of coupled rock-paper-scissors cycles
-----------------	-----------------	------------	---



Thouless Pump

Quantization of particle transport

D. J. Thouless

$$|\psi(t)\rangle \approx \exp \left[-(i/\hbar) \int^t \epsilon_0(t') dt' \right] \left[|\psi_0(t)\rangle + i\hbar \sum_{j \neq 0} |\psi_j(t)\rangle (\epsilon_j - \epsilon_0)^{-1} \langle \psi_j(t) | \dot{\psi}_0(t) \rangle \right] \quad (2.3)$$

to first order in the time derivatives, where the phase of $\psi_0(t)$ is chosen in such a way that its time derivative $\dot{\psi}_0$ is orthogonal to ψ_0 .

$$A_t = \langle \psi | \partial_t \psi \rangle = 0 \text{ (Temporal gauge)}$$

高橋G (京都)

トポロジカルポンプの実現

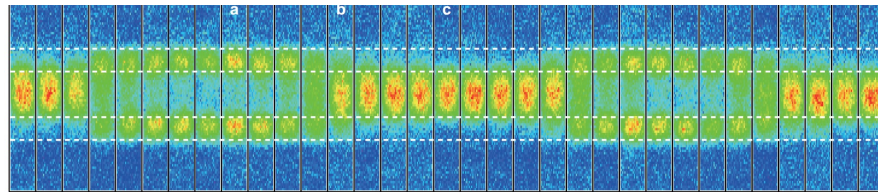
nature
physics

30年来の理論の夢を冷却原子系で世界で最初の実現

S. Nakajima, et al, Nature Physics, 12, 296(2016)

S. Nakajima, N. Takei et al., arXiv 2007.06817 (2020)

Nature Physics, accepted



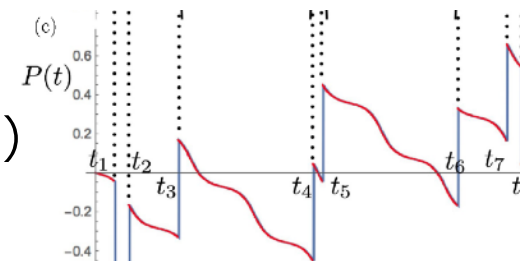
ポンプ=時間に関して周期的 すべての物理量は時間の周期関数 (1周期での変化はゼロ)

無限に大きい端のある系

bulk-edge correspondence

$$0 = \boxed{\text{バルク}} + \boxed{\text{エッジ}}$$

$$\therefore -\boxed{\text{バルク}} = \boxed{\text{エッジ}}$$

Hatsugai-Fukui,
Phys. Rev. B 94, 041102(R) (2016)

不連続

March 30 (Tue.) 2021

Yoshihito Kuno

Topological spin pump and bulk-edge correspondence in $S \geq 1$ spin chain

Koji Kudo

Adiabatic heuristic principle on a torus and anyon pumping

$$-\text{ind } \mathcal{D}^{2n+2} = \sum_{t_i} \pm 1 \quad \text{不連続}$$

バルク

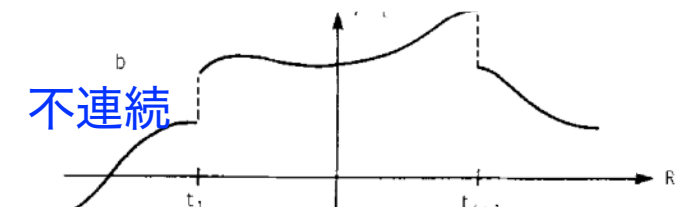
$$= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (\eta(H_{t_i^+}) - \eta(H_{t_i^-}))$$

エッジ

30年後に同じ論理!

ANNALS OF PHYSICS 163, 288-317 (1985)

Anomalies and Odd Dimensions*

L. ALVAREZ-GAUMÉ, S. DELLA PIETRA,[†] AND G. MOORE[†]

不連続

Atiyah-Patodi-Singer index theorem for manifolds with boundary

8-th workshop March 26, 29, 30 (2021)

Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts
Grant-in-Aid for Scientific Research (S) Project No.17H06138

Distinguished invited speakers

March 26, 10:50-11:30

Masaya Notomi (NTT/Tokyo Inst. Tech)

Reconfigurable topological nanophotonics and topological singular points

March 29, 10:00-10:40

Takahiro Morimoto (Univ. Tokyo)

Geometrical nonlinear phenomena

March 30, 10:50-11:30

Tomoki Ozawa (Tohoku Univ.)

Non-Hermitian geometry in synthetic metamaterials

8-th workshop March 26, 29, 30 (2021)

Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts
Grant-in-Aid for Scientific Research (S) Project No.17H06138

9:00-12:30, March 26 (Fri.) 2021						
Start	End	Chair				
9:00	9:30	A. Kimura	Project	Yasuhiro Hatsugai	U. Tsukuba	Science of bulk-edge correspondence
9:30	10:00		Project	Tohru Kawarabayashi	Toho U.	Bulk versus Edge States under Generalized Chiral Symmetry
10:00	10:40		Project	Satoshi Iwamoto	U. Tokyo	Topological photonics in various dimensions
10:40	10:50	Photo/Break				
10:50	11:30	T. Fukui	Invited (long)	Masaya Notomi	NTT/Tokyo Inst. Tech	Reconfigurable topological nanophotonics and topological singular points
11:30	11:50		Invited (short)	Natsuko Ishida	U. Tokyo	Analysis of a single-mode array laser based on a topological edge state
11:50	12:10		Invited (short)	Shun Takahashi	Kyoto Inst. Tech.	Microwave observation of an optical Weyl point and topological surface states in a chiral photonic crystal
12:10	12:30		Invited (short)	Kenichiro Imura	Hiroshima U.	Bulk-edge correspondence in non-Hermitian topological systems with non-reciprocal hopping
9:00-12:30, March 29 (Mon.) 2021						
Start	End	Chair				
9:00	9:30	S. Iwamoto	Project	Takahiro Fukui	Ibaraki U.	HOTI in a magnetic field, Dirac pump, and 1D diffusion equation
9:30	10:00		Project	Hideo Aoki	AIST/U. Tokyo	Various routes to topological superconductors
10:00	10:40		Invited (long)	Takahiro Morimoto	U. Tokyo	Geometrical nonlinear phenomena
10:40	10:50	Photo/Break				
10:50	11:30	Y. Takahashi	Project	Akio Kimura	Hiroshima U.	Nodal link semimetals and their surface states probed by ARPES
11:30	11:50		Invited (short)	Hideaki Iwasawa	QST	ARPES study on various directional planes in high-Tc cuprates seeking for zero-energy bound states
11:50	12:10		Invited (short)	Toshikaze Kariyado	NIMS	Deriving effective models in twisted bilayer systems
12:10	12:30		Invited (short)	Tsuneya Yoshida	U. Tsukuba	Chiral edge modes of coupled rock-paper-scissors cycles
9:00-12:30, March 30 (Tue.) 2021						
Start	End	Chair				
9:00	9:20	Y. Hatsugai	Invited (short)	Tomonari Mizoguchi	U. Tsukuba	Bulk-edge correspondence in semi-metals: Transfer matrix study of anti-chiral edge modes
9:20	9:40		Invited (short)	Yoshihito Kuno	U. Tsukuba	Topological spin pump and bulk-edge correspondence in $S \geq 1$ spin chain
9:40	10:00		Invited (short)	Koji Kudo	U. Tsukuba	Adiabatic heuristic principle on a torus and anyon pumping
10:00	10:40		Project	Yoshiro Takahashi	Kyoto U.	Study of topological phenomena using trapped cold atoms
10:40	10:50	Photo/Break				
10:50	11:30	T. Kawarabayashi	Invited (long)	Tomoki Ozawa	Tohoku U.	Non-Hermitian geometry in synthetic metamaterials
11:30	11:50		Invited (short)	Kazuya Yamashita	Kyoto U.	Experiment towards the realization of topological atom laser
11:50	12:10		Invited (short)	Yuma Nakamura	Kyoto U.	Development of an optical tweezer array system with Rydberg atoms
12:10	12:30		Invited (short)	Nobuyuki Takei	Kyoto U.	Competition and interplay between topology and quasi-periodic disorder in Thouless pumping of ultracold a
12:30	12:35		Project	Yasuhiro Hatsugai		Closing

*It's Informal,
enjoy !*

Enjoy this meeting !

Thank you !