

令和**6**年度 長期留学報告

所属・職名 工学部・教授

氏名 関野 恭弘

留学先 アメリカ合衆国・
スタンフォード大学

目的 「超弦理論に基づく宇宙論と
ブラックホールの量子論」の研究

期間 2024年4月2日～2025年4月3日

研究成果

1. Yasuhiro Sekino and Leonard Susskind,
“Double-Scaled SYK, QCD, and the Flat Space Limit
of de Sitter Space,” *Journal of High Energy Physics*
10 (2025) 137.
2. Shoichiro Miyashita, Yasuhiro Sekino and Leonard
Susskind, “DSSYK at Infinite Temperature: The Flat-
Space Limit and the ‘t Hooft Model,” *Journal of High
Energy Physics* 11 (2025) 107.

留学報告：

- 拓殖大学 工学部FDワークショップ, 2025年7月25日.
- 『拓殖大学 理工学研究報告』 巻23, p.31-38 (2006)

過去の滞在経験（自己紹介）

- 2014年より拓殖大学に在職。
- 着任前の2004年～2006年、学振PD特別研究員としてスタンフォード大学に所属。その後も2009年頃まで、岡山光量子科学研究所研究員として、同大学と頻繁に行き来。
- 専門分野：素粒子（高エネルギー）理論
- 今回、以前と同じ受け入れ教員（共同研究者）。
- 長期留学（サバティカル）のポスドク時代との違い：
 - 他人との競争をあまり意識しなくてよい。成果を挙げたいというだけでなく、受け入れ教員がなぜ優れた研究ができるのか知りたい、という意識を今回は持てた。そのような意識の持ち方が、良い成果につながったと思う。
 - 以前は独身だったが、今回、妻と娘（小3）と滞在。社会の様々な良い面を経験。

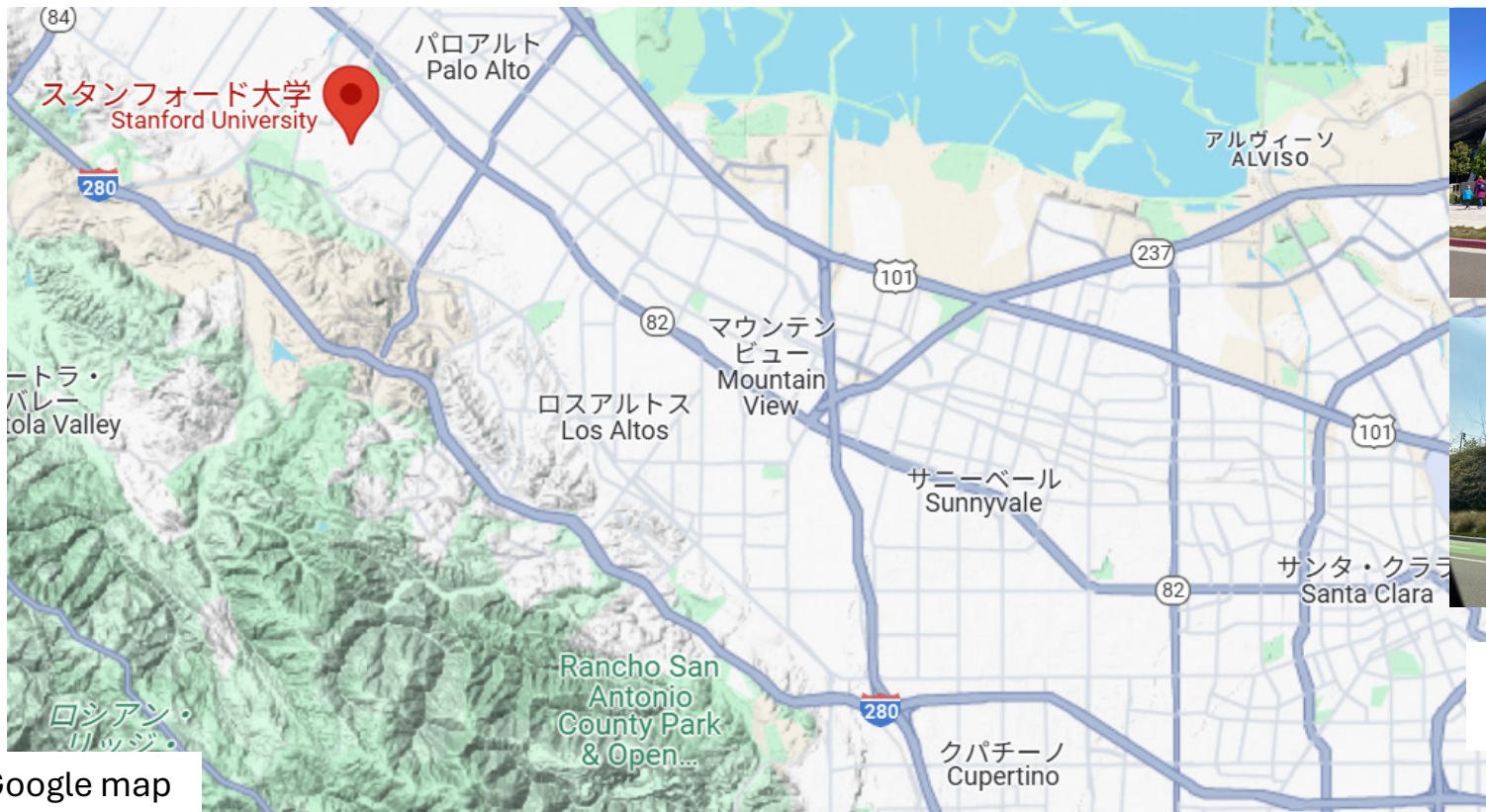
スタンフォード大学の所在地

- カリフォルニア州、サンフランシスコ・ベイエリア
- サンフランシスコとサンノゼの中間
- 「シリコンバレー」
（スタンフォード大学を中心として、サンマテオあたりからサンノゼまでを指す。）
- 湾の対岸（イースト・ベイ）には、バークレー、オークランド
- 太平洋側とは、山で隔てられている。

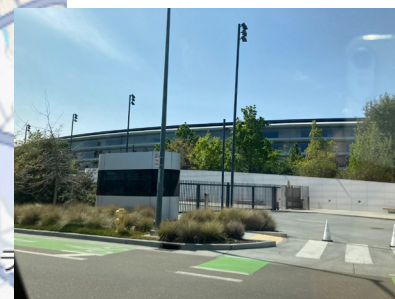
Google map



- スタンフォード大学最寄りの町：パロアルト
 - 大学の構内のみ、スタンフォード市
- 自宅：マウンテンビュー
(グーグル本社：マウンテンビュー、アップル本社：クパチーノ)



Google map



上：グーグル
下：アップル

スタンフォード大学



- 正式名称：
リーランド・スタンフォード・ジュニア大学
- **1891**年創立。（比較的新しい）
- 大陸横断鉄道で財をなしたL・スタンフォードが、ハーバード大学在籍中に死去した息子の名前を冠して、地元に設立。



スタンフォード大学の特徴

- 敷地が広大
- 産学連携が盛ん
 - 「シリコンバレー」とともに発展
- 資金が豊富
 - いつ行っても新しい建物が建設中



Wikipediaより。CC BY 3.0

大学の運営方針

アメリカの大学全般の特徴だが、スタンフォードは特に：

- そのとき重要とされるテーマに集中
 - 自分なりのテーマに地道に取り組むのが美德、という雰囲気はない。
- 指導的な研究者を招いて、その人を中心にグループを形成
 - 私の受け入れ教員は、そのような研究者の典型例。

政治家関係

- フーバー元大統領（卒業生、1929-1933在職、共和党）
 - 学内に「フーバー研究所」（保守系公共政策シンクタンク）
- コンドリーザ・ライス（フーバー研究所教授、ジョージ・W・ブッシュ政権の国務長官）
- チェルシー・クリントン（卒業生、クリントン大統領の娘）

スポーツ

- ・タイガー・ウッズ（中退）、佐々木麟太郎（在学中、野球）

IT関係者（卒業生多数）

- ヒューレット、パッカード
- ジェリー・ヤン（Yahoo創業者）
- ラリー・ペイジ、セルゲイ・ブリン（Google創業者）

研究者（教員）：物理以外では、

- ジョージ・ポリア（数学）
- ドナルド・クヌース（計算機科学）



宇宙飛行士（卒業生多数）
上：女性宇宙飛行士紹介パネル

学内の建物

- 左下：Hewlett
(教室と講堂)
- 右：Packard
(電気工学科)
- 右下：Gates (コ
ンピュータ科学)

写真：いずれも大学ホームページより



最近建設された巨大な建物（重要とされる分野にすぐに新学科が設置）

- 上：Yang & Yamazaki（Yahoo創業者夫妻）（環境・エネルギー）約10年前
- 下：Computing and Data Science Building（データサイエンス）今年完成



写真：大学ホームページより

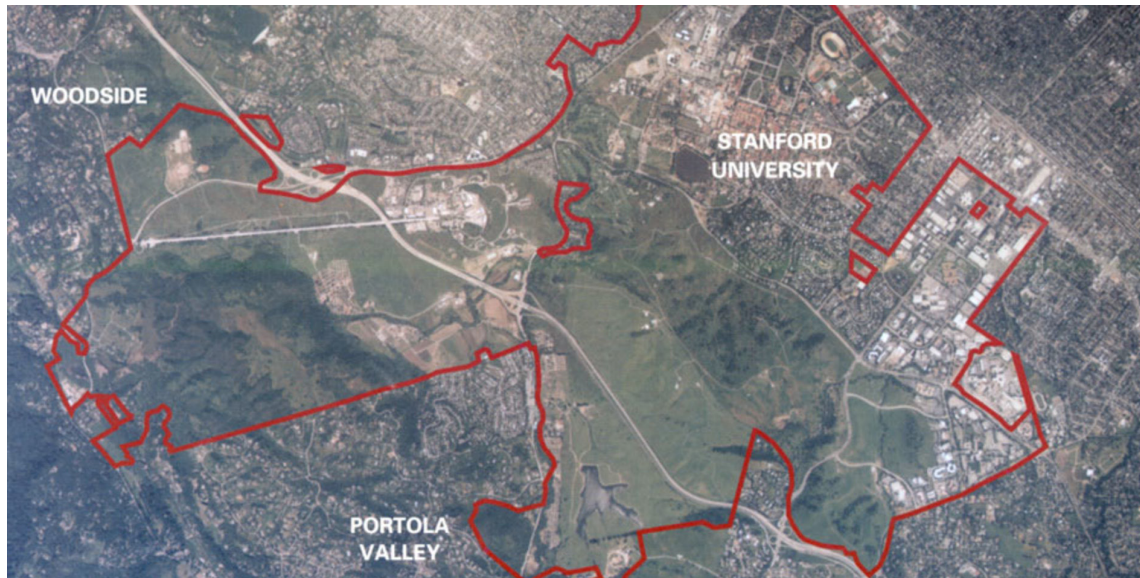


写真：大学ホームページより



大学の全所有地はキャンパスの7倍の約33 km²。以下を含む：

- SLAC（加速器）
- Stanford Research Park（大学に隣接する企業研究所の集合体）
- Dish area（電波アンテナがある丘、ハイキングコース）
- 高級ショッピングセンター、ゴルフコース等
- スタンフォードの遺言で売却できないため、使われていない山林も多い。



大学ホームページより

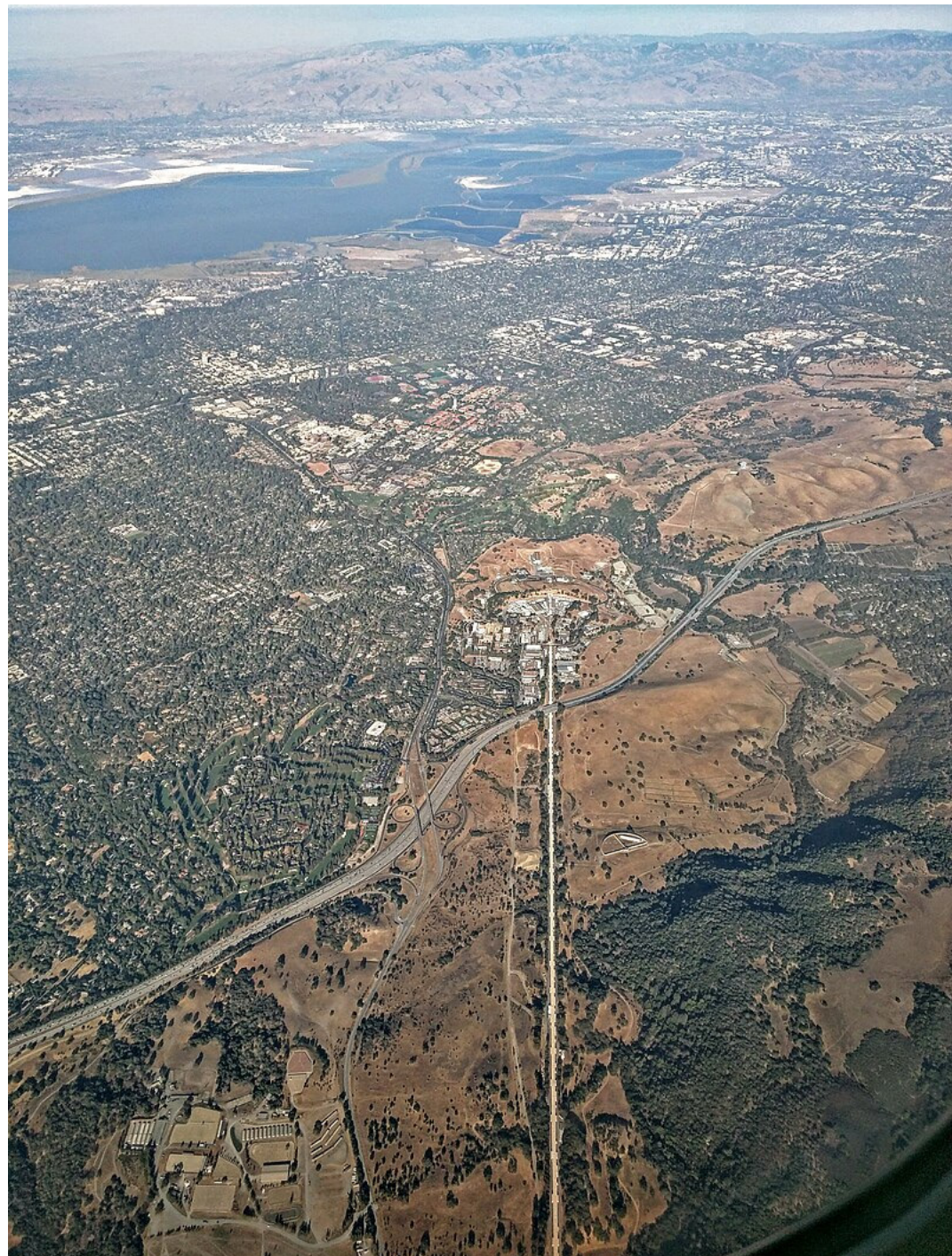


Dish area

SLAC国立加速器研究所 (旧称：スタンフォード 線形加速器センター)

- 高エネルギー（素粒子）実験で多くの成果
 - 3回のノーベル賞
(チャームクォークの発見、陽子や中性子中
クォーク構造、タウ粒子の発見)
- 高エネルギー実験から撤退し、現在は、レーザーやX線研究。
 - 日本の高エネルギー加速器研究機構（「Bファクトリー」のアップグレード）と対照的

写真：Wikipediaより
CC BY-SA 4.0



Stanford Research Park

- 1951年にスタンフォード工学部教授のFrederick Termanが中心になって設立。
 - 初期からの企業：Hewlett Packard
- 産学連携（大学へのアクセス、卒業生の雇用）
 - 大学やパロアルト市の財政に大きく貢献。
 - シリコンバレーの形成に中心的な役割。
 - 約150社：HP、テスラ、ロッキード等
- Xerox PARC（パロアルト研究所）が有名
 - パーソナルコンピューターの原型
 - GUI、マウス（Appleが、Macintoshとして利用）
 - レーザープリンターの発明、イーサネット（LAN）の開発



（SRIホームページより）



Stanford Research Park
（SRIホームページより）



写真：州知事事務所



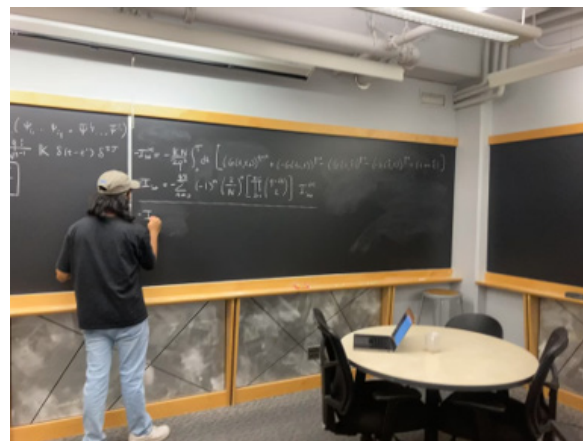
現在のPARC

研究活動

物理学科のStanford Institute for Theoretical Physics (SITP) に滞在



物理学科 (Varian Physics building)



SITP の共有スペース



研究室



研究室の窓から

SITP：理論物理のいくつかの分野の研究者が集まって構成。

教員は、いずれも非常に著名な研究者

- Stephen Shenker, Douglas Stanford, Eva Silverstein, Renata Kallosh, Andrei Linde, Savas Dimopoulos, Patrick Hayden, Xiaolian Qi, ...
- Susskind教授（私の受け入れ教員）が（私が知るだけでも）この人たちの引き抜きに大きな役割。



私の所属分野：超弦理論（超ひも理論）

- 広い意味での基本理論（量子重力）の研究。

分野間交流を促進するため1つの組織に。

- 実際、交流があるかは時期による。20年前頃は超弦理論と宇宙論の交流が非常に盛ん。現在は、超弦理論と量子情報の交流が多少ある。

セミナー（専門的な研究発表）が多数。

- 同分野だけで週2回程度。私も1回講演。非常に質問が活発。

Gauge/gravity correspondence
at **weak 't Hooft coupling**
and **without conformal symmetry**

Yasuhiro Sekino
(Takushoku University/Stanford)

References:

- YS, PTEP 2020 (2020) 2, 021B01 [arXiv:1909.06621].
- T. Kitamura, S. Miyashita and YS, PTEP 2022(2022) 4, 043B03 [arXiv: 2109.12091].

- コロキウム：アメリカの大学に特有の、物理学科全体を対象にした、広い範囲の聴衆向けのセミナー（週1回）
 - 「アメリカらしい」話が聞けることもあり、興味深い。
（過去には、スペースシャトル事故調査委員会の話や、盲目の人の脳に視覚の信号を送る研究等。最近では、ダークエネルギーの観測等。）
 - このような専門分野以外のセミナーを聞くのは楽しいが、共同研究を始めてからは、それらに出席する時間があまり取れなかった。

Applied Physics/Physics Colloquium

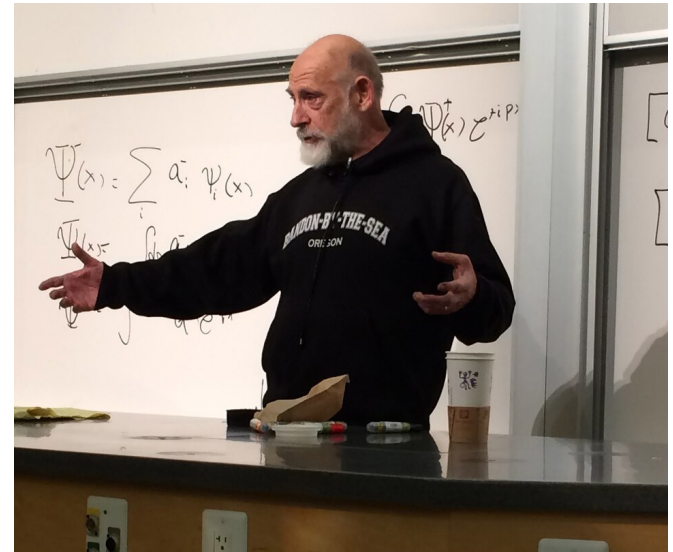
Academic Year 2024/2025

Spring colloquium committee: Michelson (chair), Khemani, Raghu, Reis

DATE	SPEAKER	INSTITUTION	HOST	TITLE
4/1/2025	Erez Berg	Weizmann Institute of Science	Steve Kivelson	Video: Theory of Strange Metals
4/8/2025	Naoko Kurahashi Neilson	Drexel	Giorgio Gratta	Video: The Present and Future of High-Energy Neutrino Astronomy
4/15/2025	Ania Bleszynski	UCSB	Steve Chu	New Directions in Quantum Sensing with

受け入れ教員： レナード・サスキンド教授

- 1940年生まれ（85歳）
- 1979年からスタンフォード大学教授（現在も現役）
- 主な業績（Wikipediaより）：
 - 弦理論（ひも理論）の創始者の1人（1970年頃）
 - 「ホログラフィー原理」を提唱（1990年代以降）
 - 「超弦理論のランドスケープ」（超弦理論に基づく宇宙論）（2000年代以降）



Wikipediaより
CC BY-SA 3.0

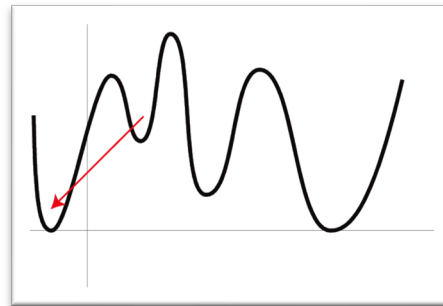
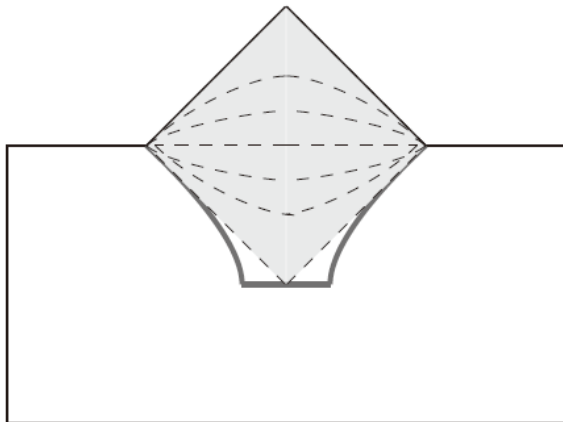
Susskind is widely regarded as one of the fathers of [string theory](#).^[8] He was the first to give a precise string-theoretic interpretation of the [holographic principle](#) in 1995^[9] and the first to introduce the idea of the [string theory landscape](#) in 2003.^{[10][11]}

- ホログラフィー原理：



- 量子重力理論では、空間は、その表面上の情報を用いて表されるという仮説。
- 科研費学術変革A「極限宇宙」ニュースレター（2023年2月）関野による解説：
<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~extremeuniverse/category/outreach/>
- ブラックホール内部の情報は地平面上に蓄積され、いずれ外部に放出される。
（これについて、過去に1編共著論文）
- 証明は無いが、超弦理論において様々な証拠があり、広く受け入れられている。

- 超弦理論のランドスケープ：



- 我々の宇宙は、大きい膨張率を持った宇宙の中で、バブルの生成によりできたと考えられる。（これについて過去に4編共著論文）
- 本学の授業（教養科目「天文学B」）で紹介し、好評。

- サスキンド教授の著書：



- 一般（社会人）向けクラス
の内容に基づく著書：



- サスキンド教授の経歴：

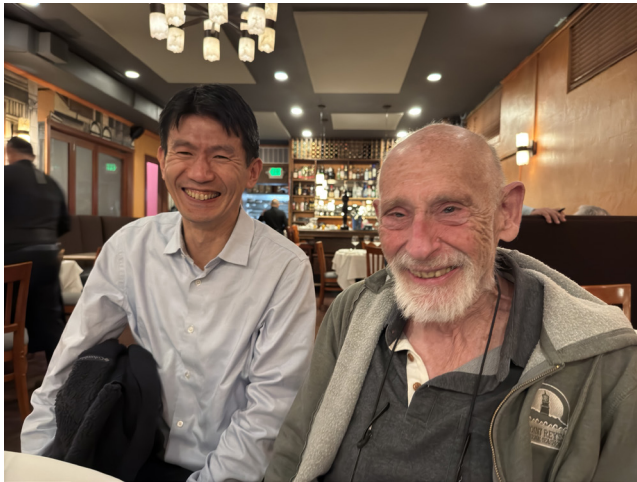
- ニューヨーク（ブロンクス）出身、ユダヤ系
- 父親は配管工（珍しい出自）、ニューヨーク市立大学（CCNY）機械工学科に入学し、物理に移って1962年卒業。
- コーネル大学で1965年に博士号。

- 本人の回想：

（著書等で語られておらず、今回初めて聞いた話）

- 有名な量子光学の論文（Glogowerとの共著）は在学中に発表。授業の課題が間違えているのではないかと思ひ考え始めた。周りから発表するよう勧められた。
- 在学中の論文はその1編で、今日の基準から見ると少ないが、優秀だということは知られていたもので、修了後すぐにイエシヴァ大学に職を得た。

- 弦理論の発見についての本人の回想：
(著書等で語られておらず、今回初めて聞いた話)
 - 中間子の散乱を表す「ベネチアーノ振幅」の極（関数が無限大になる点）が等間隔で現れることから、弦のような調和振動子（エネルギー準位が等間隔）の集まりで表されるはずだと「すぐに気づいた」。
 - これを分かっているのは自分だけだと思っていたが、南部陽一郎さんが独立に同様のことを発表していたことを知り、最初がっかりしたが、偉大な南部と同じことを考えていたのを嬉しく思うようになった。



パロアルトのイタリア料理店にて

サスキンド教授の研究者としての特徴：

- 「物理的直観に優れた人」（私の大学院指導教官、米谷民明）
- 「『やりすぎない』ことを心得ている」（Edward Farhi）
 - 量子力学と相対性理論の枠内を出ることはしていない。
- 様々なアイディアを好き勝手に言っている人のように思われることがあるかもしれないが、そういうわけではなく、理論的基礎（整合性）を非常に気にしている。（私の印象）
 - その点で、私としては話しやすく感じる。私がそういう感じを持っているため、共同研究しやすいと感じてもらえているのかもしれない。
- 論文を書こうという意欲が凄い。（私の印象）
 - 「この段階で書き始めるの？」と思うこともある。
 - おそらく、何度も見直して書き直している。

- 左：サスキンド教授のご自宅。
 - パルアルトの「ミッドタウン」（閑静な住宅街）。今では、このあたりに家を買えるのはIT関係者くらいだろうとのこと。
- 右：家族でハイキングに誘って頂いた、Foothills Parkにて



サスキンド教授との共同研究（学術的背景）

- 加速膨張する宇宙（現在の宇宙や、宇宙初期の「インフレーション」期）は、理論的扱いが難しい。
- 困難の理由1：ドジッター空間（加速膨張宇宙）は、大域的には「閉じた宇宙」なので、境界条件の関数として物理量を定義することができない。
 - それに対して、「開いた宇宙」である反ドジッター（AdS）空間は、現実の宇宙とは性質が違うが、理論的に扱い。AdS上の量子重力については、1997年以降、超弦理論に基づく大きな発展があった。
- 困難の理由2：ドジッター空間では、指数的な宇宙膨張のため、観測者の「事象の地平面」が存在する。
 - その外に出たものからの信号をその後受け取ることはできない。
 - 地平面の外の自由度を理論的にどう扱うべきかは、未解決の難問。
- サスキンド教授は、2022年以降、ドジッター空間の量子重力理論のホログラフィー原理に基づく定式化を提唱。
 - 観測者の事象の地平面上の理論で、ドジッター空間を記述。
 - 地平面上の理論は、Sachdev-Ye-Kitaev（SYK）モデルであると提唱。

滞在中の2025年1月に共著論文（プレプリント）を発表：

- **SYK**模型（前述）で「平坦空間極限」（我々の宇宙のように膨張率が小さい極限）の存在を示し、提案の整合性の根拠を与えた。
- **SYK**模型と**QCD**（クォーク間の相互作用を記述する理論）の類似性を指摘した。**QCD**の平坦空間極限の存在条件を明らかにした。これは、反ドジッター空間の量子重力（前述）との関連で重要。

arXiv:2501.09423v1 [hep-th] 16 Jan 2025

Double-Scaled SYK, QCD, and the Flat Space Limit of de Sitter Space

Yasuhiro Sekino^{3,1} and Leonard Susskind^{1,2}

¹SITP, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

²Google, Mountain View, CA 94043, USA

³Department of Liberal Arts and Sciences, Faculty of Engineering,
Takushoku University, Hachioji, Tokyo 193-0985, Japan

Abstract

A surprising connection exists between double-scaled SYK at infinite temperature, and large N QCD. The large N expansions of the two theories have the same form; the 't Hooft limit of QCD parallels the fixed p limit of SYK (for a theory with p -fermion interactions), and the limit of fixed gauge coupling g_{ym} —the flat space limit in AdS/CFT—parallels the double-scaled limit of SYK. From the holographic perspective fixed g_{ym} is the far more interesting limit of gauge theory, but very little is known about it. DSSYK allows us to explore it in a more tractable example. The connection is illustrated by perturbative and non-perturbative DSSYK calculations, and comparing the results with known properties of Yang Mills theory.

The correspondence is largely independent of the conjectured duality between DSSYK and de Sitter space, but may have a good deal to tell us about it.

帰国後、2025年6月に宮下翔一郎氏（台湾・国立東華大学）を含めた3人で共著論文（プレプリント）を発表。

- ドジッター空間の事象の地平面付近の重力は、トホーフト模型（ $(1+1)$ 次元QCD）と等価であることを予想。SYK模型とトホーフト模型の対称性が一致することが根拠。これが正しければ、今後、SYK模型とドジッター空間上の重力の等価性を示すにあたって重要な進展。

DSSYK at Infinite Temperature: The Flat-Space Limit and the 't Hooft Model

Shoichiro Miyashita¹, Yasuhiro Sekino², and Leonard Susskind^{3,4}

¹*Department of Physics, National Dong Hwa University, Hualien 97401, Taiwan, R.O.C.*

²*Department of Liberal Arts and Sciences, Faculty of Engineering, Takushoku University, Hachioji, Tokyo 193-0985, Japan*

³*Stanford Institute for Theoretical Physics and Department of Physics, Stanford University, Stanford, CA 94305-4060, USA*

⁴*Google, Mountain View, CA, USA*

Abstract

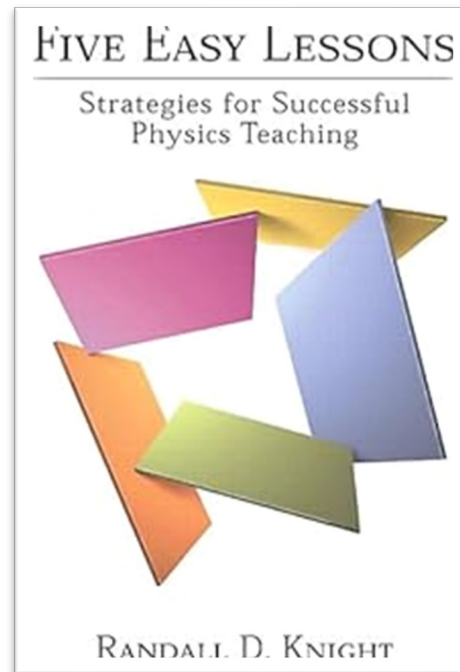
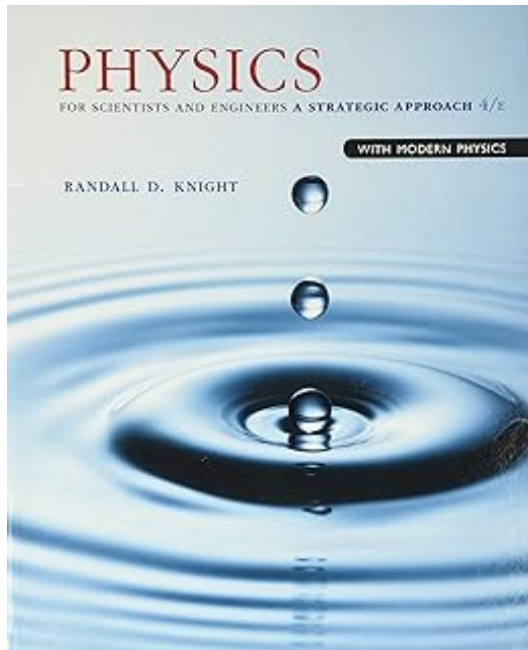
In the limit of infinite radius de Sitter space becomes locally flat and the static patch tends to Rindler space. A holographic description of the static patch must result in a holographic description of some flat space theory, expressed in Rindler coordinates. Given such a holographic theory how does one decode the hologram and determine the bulk flat space theory, its particle spectrum, forces, and bulk quantum fields? In this paper we will answer this question for a particular case: DSSYK at infinite temperature and

宮下氏：科研費「極限宇宙」により、2度スタンフォードを訪問。1回は、「若手海外派遣プログラム」により。

物理教育研究に関する活動

ランドール・ナイト教授（カリフォルニア州立ポリテクニク大学 名誉教授）と2度（オークランドとバークレーで）面会。

- アクティブラーニングや物理教育研究に早い時期から取り組んでいた。
- 極めて優れた大学初年度向け物理教科書と教員用の解説書の著者
 - 私は、自分で考えたかこの人の本で読んだか分からないことがあるほど、物理教育に関して影響を受けている。
- 実際お会いすると、非常に気さくな（率直な）人柄



ナイト教授に直接お会いして感じたこと：

- 「自然法則は人間が発見したものだ」という視点
 - 絶対の真実として、誰かから与えられたのではない。
 - その視点のため、論理の飛躍が全くない分かりやすい教科書になっているのだと思われる。（「物理は数学ではない」ので、式の導出を詳しく書けば分かりやすくなるとは限らない。）
- アクティブ・ラーニングに対する疑問がかなり解消された。
 - 私も部分的に導入しているが、世間でアクティブ・ラーニングと呼ばれているものは、深い学びにつながらない遊びのようなものか、学生に課題を行わせるための管理教育のどちらかであるように感じられ、有効性に確信は持てていなかった。
 - しかし、これだけの能力を持った人が実践しているという事実自体に強い説得力があった。
 - 物理の内容や教育方法について、楽しく意見交換ができた。
- 大学初年次教科書は、世界に比べて日本で一番遅れているものの一つではないか。（私はそれを改善しなければならない立場だが。）

その他（大学スポーツ）

- 佐々木麟太郎選手：スタンフォード大学1年生在学中。

STANFORD

BASEBALL

STARTING LINE-UP

STANFORD

*			
1.	5	Haskins, T.	3B
2.	10	Larson, B.	DH
3.	3	Sasaki, R.	1B
4.	21	Saum, C.	C
5.	6	Nati, J.	2B
6.	27	Reynolds, B.	RF
7.	2	Becerra, T.	SS
8.	10	Bates, C.	CF
9.	4	Marsh, T.	LF
	42	Lim, C.	LHP

		Cal	
*			
1.	1	Advincula, J.	2B
2.	22	Birge, A.	C
3.	2	Campbell, C.	3B
4.	17	Tayman, R.	DH
5.	10	Montzouridis, PJ	SS
6.	15	French, J.	RF
7.	3	Gwynn, S.	CF
8.	38	Smaldino, D.	1B
9.	8	Schmidt, C.	LF
	46	Eddy, G.	RHP



先発メンバー表（3番、一塁）

佐々木選手がホームランを放った一球

- Cal（UCバークレー）対スタンフォード（2025年3月22日、スタンフォードにて）を観戦。試合は4-13で敗戦。
 - スタンフォードは、名門だが強豪とまでは言えないのでは。
 - 佐々木選手は、日本のソフトバンク（SB）からドラフト1位指名を受けた。成長できる環境がどこかを考えたら、SBに入団するのでは。

その他（小学校、自宅）

- 小学校（ロスアルトス市立）
 - リラックスした雰囲気。
 - 週4～5日、30分の英語の補習授業あり。
 - 父兄ボランティアが求められる。私は Living Classroom（栽培の授業）の手伝い。
 - 作文の「OREO」(Opinion → Reason → Example → Opinion)は、日本でも強調すべきでは。
- 自宅：マウンテンビュー市
 - 子供中心に、隣人家族と親しい付き合い。



3rd Grade - Life Cycle of a Tomato
Saving & Planting Heirloom Tomato Seeds

Last Revised: 9/22/2023ccsh

Lesson Description: Students study the tomato plant life cycle as they harvest and save seeds from heirloom tomatoes that they plant later in the school year. Students learn about yeast, a type of fungus that will help to clean the seeds they harvest. Students also study the history of tomatoes around the world and make yummy salsa to eat.

Objectives: Students will learn the life cycle and parts of a tomato plant. Students will understand what tomatoes need to grow and the role that that fungi play in the environment. Students will learn where tomatoes originated and how they gained popularity around the world. Students will learn how to make salsa.

Curriculum Connections:

Next Generation Science Standards	3-LS1-1. Develop models to describe that organisms have unique and diverse life cycles but all have in common birth, growth, reproduction, and death. 3-LS3-1. Analyze and interpret data to provide evidence that plants and animals have traits inherited from parents and that variation of these traits exists in a group of similar organisms.
Common Core Connections	SL.3 Ask and answer questions about information from a speaker, offering appropriate elaboration & detail. L.5.b Identify real life connections between words and their use.
Framework for K-12 Science	Disciplinary Core Ideas LS1.B: Growth and Development of Organisms Reproduction is essential to the continued existence of every kind of organism. Plants and animals have unique and diverse life cycles.



Of those guests invited 2 people. How many people were at the party?

In opinion writing, what does O.R.E.O. mean?

CURRICULUM SPOTLIGHT			
Math	Reading	Writing	Character Strong
This week we will start a new unit. It begins with reviewing the base-10 place-value system to the thousands. Students will define <u>addition</u> situations and use multiple strategies to solve <u>3 digit addition</u> with regrouping. More information can be found <u>here</u>.	This week we will dive deeper into a story mountain. Students will develop character theories that include a <u>character trait</u> and evidence from the text to support their thinking.	This week we will plan and draft multiple opinion pieces. Students will learn that the structure of opinion writing <u>includes</u>: claim, reason, evidence, and claim. They will use this structure to write opinion paragraphs.	We have developed our norms for Room 14 around the traits of Respect, Responsibility, and Safety. This week, we will wrap up our kindness kick off unit.

その他（カリフォルニアの自然）

- デスバレー国立公園（ネバダ州境近くの砂漠）



- ブターノ峡谷（太平洋との間の山地、友人の別荘）と太平洋岸



その他（生活全般）

- 物価は非常に高い。
 - 中国から安く輸入して大量生産・消費していたやり方が機能しなくなったのだから、物価高は当然か。関税で、今後さらなる物価高か。
- 大統領選挙（2024年11月）
 - なぜこのような選挙結果になったのか分らないが、アメリカには、自分たちでルールを作るという文化があるので、大統領があれこれやろうとすること自体は（良くても悪くても）好まれるのかもしれない。
 - 政府がやることは全てうまくいかないからやめるべきだという考え方（「小さい政府」）が根強くあるのかもしれない。
- トランプ政権発足後（2025年1月）
 - 小学校の校長先生から「学校は子供を守ります。ICE（移民・関税執行局）の職員が来ても正式な書類が無い限り学校に入れません。」というメールがあった。校長が姿勢をはっきり示すのは立派だと思う。
 - 大学補助金や研究費の先行きが不透明なため、研究員の雇用に慎重になる研究機関が多く、若い研究者が苦労しているという話はよく聞く。

まとめ

- 1年間スタンフォード大学で研究に専念する機会を与えて頂き、レナード・サスキンド教授との共同研究で大きな成果を挙げることが出来ました。
- また、物理教育に関しても、第一人者との面会がかない、多くを学ぶことができました。
- 多くの人（研究関係者、大学ボランティア、近隣の人々、子供の小学校関係者など）との交流により、アメリカ的な考え方に触れて、アメリカの良い面を肌で感じる事ができました。本報告でその一端をお伝えできていれば幸いです。