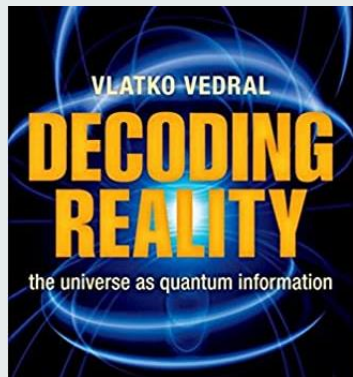
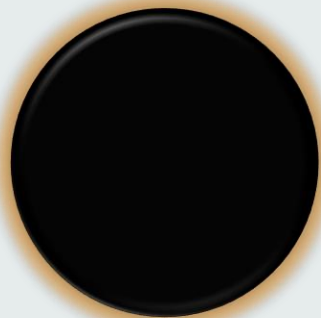




量子情報と ブラックホール



東京大学 光量子科学研究センター 助教
中田芳史



今回の講義の全体的な予定



1. 自己紹介
2. 量子情報と素粒子物理
 - 量子情報の歴史を簡単に。
3. ブラックホールの情報パラドクスへの量子情報的アプローチ

自己



中国
物理



修士課程(2年)  青年海外協力隊(2年)  東大博士課程(3年)
村尾研 (量子情報) エチオピア (数学教師) 理物：村尾研 (量子情報)

石の上にも三年！
三年いたらでくの坊

東京大学(現職) ハノーファー大学(2年)
Werner研 (数理論理・量子情報)

 京都大学(1.5年)  東京大学(2年)  バルセロナ自治大学(1.5年)
量子情報グループ 小芦研 (量子情報) Winter研 (数学・量子情報)

自己紹介



中田 芳史 (38)

出身地：大阪

出身大学：東京大学理学部物理（最終日に講義する山崎大先生と同期）

専門分野：量子情報科学

なぜ、素粒子パートで講師を務めることになったのか？



知りません。。。。

自己紹介



中田 芳史 (38)

- 近年、素粒子の一部で量子情報の手法に基づく様々な成果に繋がっていることは事実。
- 素粒子でこの潮流が今後も続くかどうかは僕には分かりませんが、物理学全般では、量子情報は「自然界を記述する新しい基本言語」として浸透しつつある。
 - トポロジカル秩序、テンソル・ネットワーク、AdS/CFTでのエンタングルメント・エントロピー、情報熱力学、等々

「物理の量子情報革命」、**「従来の物理学の教科書を書き換えるような変革」**

- 「量子情報の考え方の基礎や言葉遣い」に触れるのは重要。

目標：ブラックホールの玩具模型を用いて、量子情報の考え方の「キ」に触れる

今回の講義の全体的な予定



1. 自己紹介
2. 量子情報と素粒子物理
 - 量子情報の歴史を簡単に。

なぜ「量子情報の考え方」が広範囲の自然科学に普遍的に役立つのか？

3. ブラックホールの情報パラドクスへの量子情報的アプローチ

量子情報の歴史1



1982 Feynman: 「量子系をシミュレートするには、量子系を用いるのがよい」

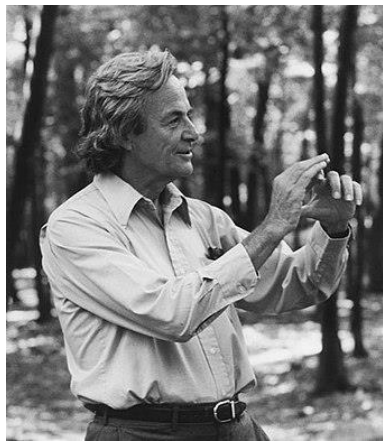
1984 Bennett: 量子系を用いた、原理的に盗聴できない暗号通信

1985 Deutsch: 量子チューリングマシンの提唱

量子シミュレータ

量子暗号

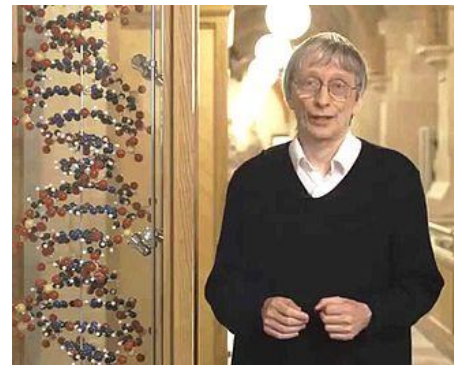
量子コンピュータの基礎



R. Feynman



C. Bennett



D. Deutsch

量子情報の歴史1



1982 Feynman: 「量子系をシミュレートするには、量子系を用いるのがよい」

量子シミュレータ

1984 Bennett: 量子系を用いた、原理的に盗聴できない暗号通信

量子暗号

1985 Deutsch: 量子チューリングマシンの提唱

量子コンピュータの基礎

⋮

1994 Shor: 因数分解の量子アルゴリズム(現在のRSA暗号を~8hで解読) 量子コンピュータの実用性

1995 Schumacher: 「量子系における情報」の圧縮(「qubit」の提唱)

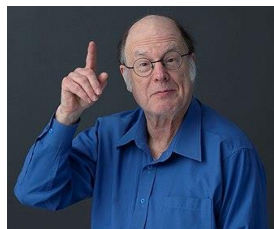
「量子の情報」とは？

1995 Shor: 「量子誤り訂正符号＝量子ノイズを実効的にキャンセルする手法」の提唱

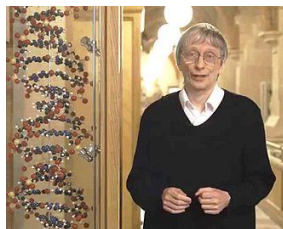
量子情報処理の真の幕開け
“アナログ” から “デジタル” へ



R. Feynman



C. Bennett



D. Deutsch



P. Shor



B. Schumacher

量子情報の歴史1



J. Preskill



A. Kitaev

たくさんの人

素粒子物理に関係のある人たち

を用いるのがよい」
音号通信

量子シミュレータ
量子暗号

量子コンピュータの基礎

量子コンピュータの実用性
「情報」とは？

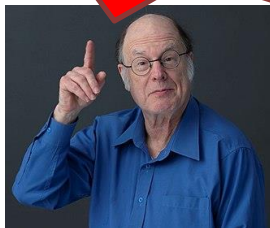
キャンセルする手法」の提唱



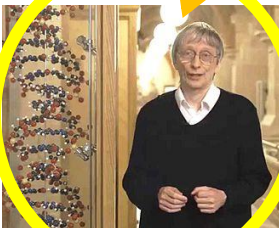
爆発的な発展



R. Feynman



C. Bennett



D. Deutsch



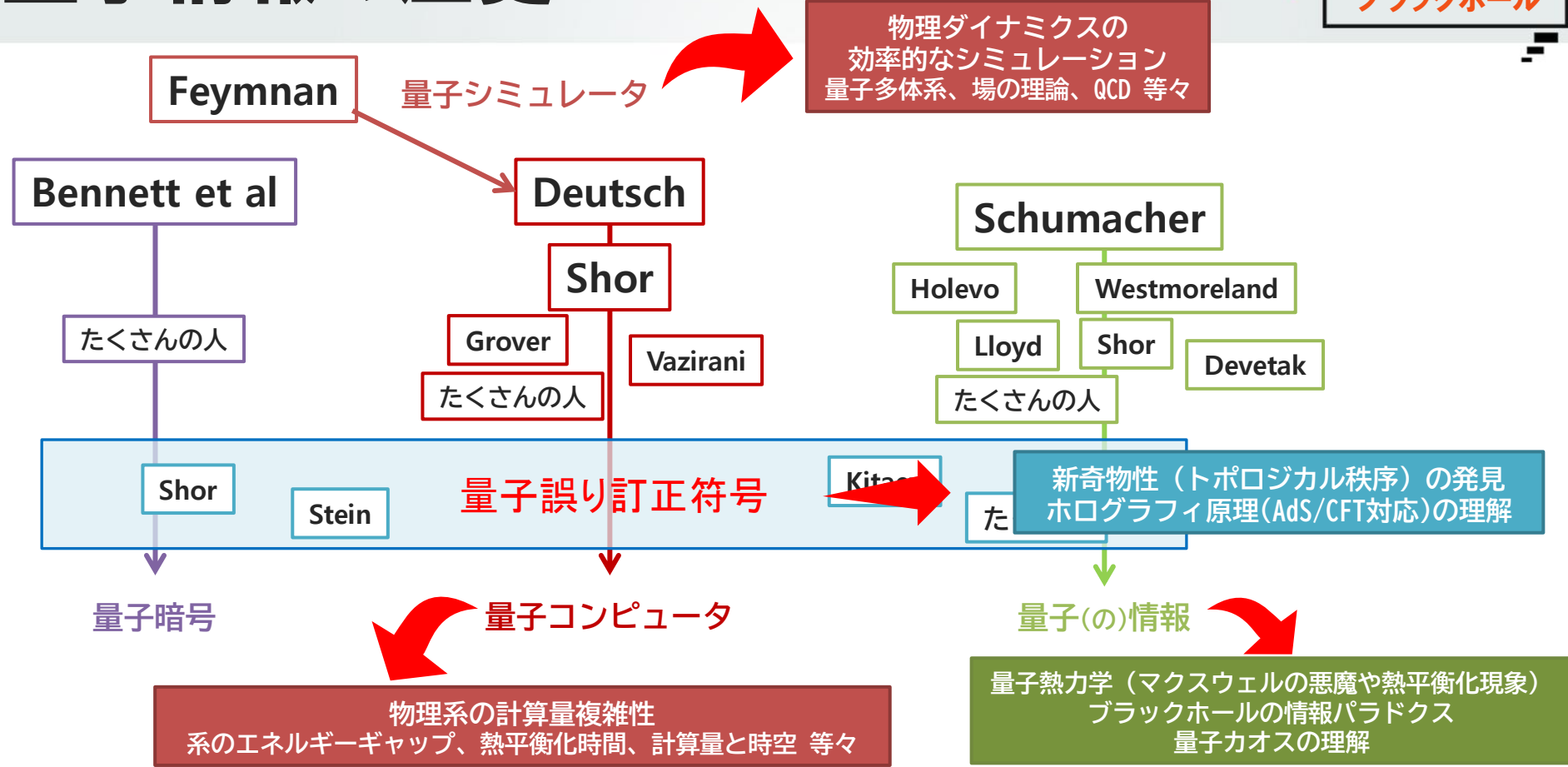
P. Shor



B. Schumacher

量子情報処理の真の幕開け
“アナログ” から “デジタル” へ

量子情報の歴史2



なぜ量子情報が役立つのか？



量子情報科学 = 最小限の公理から構築された極めて普遍性の高い情報科学

量子力学の四公理

1. **状態**はヒルベルト空間のユニットベクトルで与えられる
2. **ダイナミクス**はユニタリ演算子で与えられる
3. **測定**は直交射影演算子の組で与えられる
4. **多粒子系**は、各系のテンソル積で表される

~~運動方程式~~
$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = H |\psi(t)\rangle$$

~~対称性~~ ~~状態方程式~~
$$SU(3) \times SU(2) \times U(1) \quad pV = nRT$$

より少ない公理から構築された枠組みは、より広い一般性・応用範囲を持つ。

例)「四公理＋幾つかの制限 = 通常確率論」

「四公理＋対称性 = 対称性を持った情報処理」

量子情報理論でできること

(古典)情報理論
でできること

対称性を持つ系で出来ること

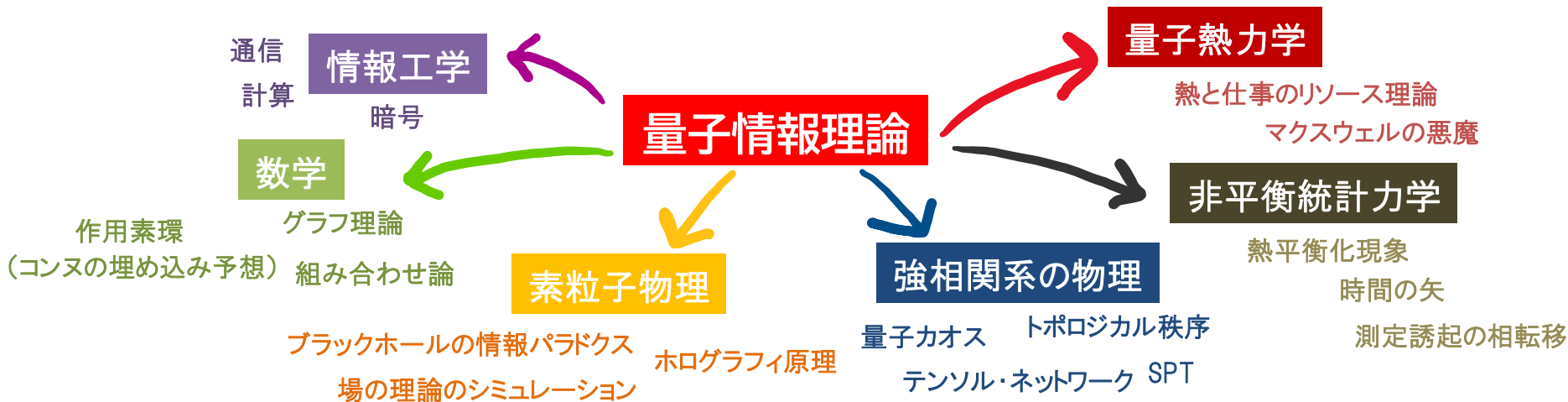
なぜ量子情報が役立つのか？



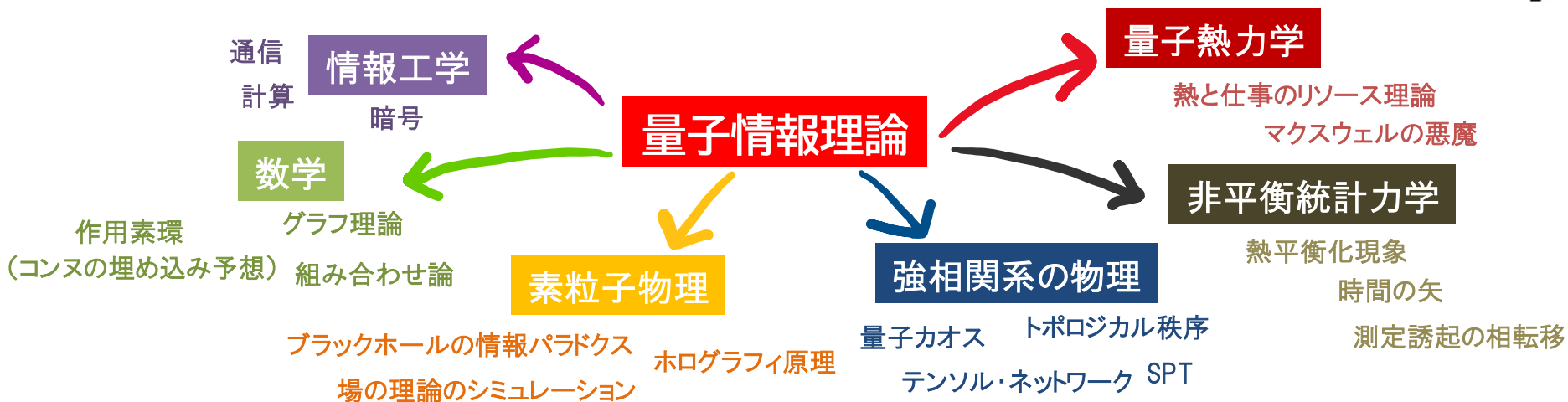
量子情報科学 = 最小限の公理から構築された極めて普遍性の高い情報科学

- もととの仮定が少ないため、多くの異なる理論へ応用することが可能。
- 「情報」に着目することで、一見すると複雑な現象の本質をよりよく理解できる(ことがある)。

量子情報 = 様々な分野にまたがる「科学の新しい共通言語」



なぜ量子情報が役立つのか？



- このパラダイム・シフトに慣れるため、「**量子情報の発想**」に慣れておくのは**有意義**かと。
 - 欧米や中国では学部で量子情報を教え始めており、各分野で量子情報のエッセンスを取り入れた
- 目標：ブラックホールの玩具模型を用いて、量子情報の考え方の「キ」に触れる**
- 日本では「量子コンピュータの産業応用」とか「新ビジネス」の側面ばかりが強調。**量子情報科学が「拝金主義」と化しており、科学への貢献が蔑ろにされている。。**
 - 日本でも「**科学としての量子情報**」を忘れないで！

本講義での目標



ブラックホールの情報パラドクスへの量子情報的アプローチ

1. ブラックホール(BH)の情報パラドクスとは何か？
 - 量子情報的な視点から。
2. 「量子の情報」の基本的な考え方や枠組みに触れる。
 - 量子情報の基礎
 - 「量子情報」と「デカップリング」
3. 量子ブラックホールと量子カオス(Sachdev-Ye-Kitaev模型)

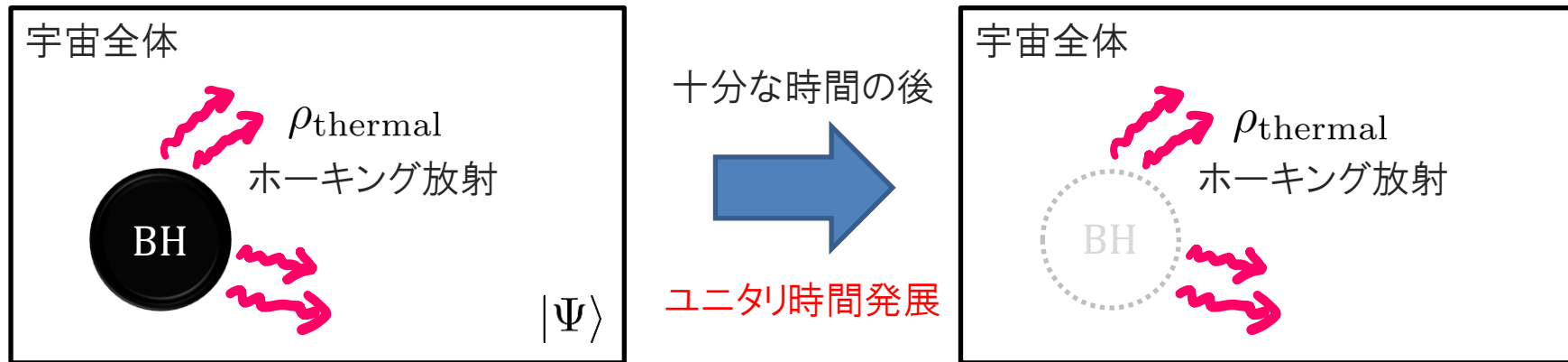
参考文献:

1. P. Hayden and J. Preskill, "Black holes as mirrors: quantum information in random subsystems", JHEP 0709:120 (2007).
2. D. Harlow, "Jerusalem Lectures on Black Holes and Quantum Information", Rev. Mod. Phys. 88, 15002 (2016).
3. J. Maldacena and D. Stanford, "Comments on the Sachdev-Ye-Kitaev model", Phys. Rev. D 94, 106002 (2016).
4. Quantum informationについては、Nielsen&Chuangの教科書が未だに標準的

ブラックホールの情報パラドクス1



極めて単純化された宇宙と、ブラックホールを考える。



一般相対論が予言すること

BHの内部からは光すら脱出できない。従って、BHのエネルギーは減少しない。

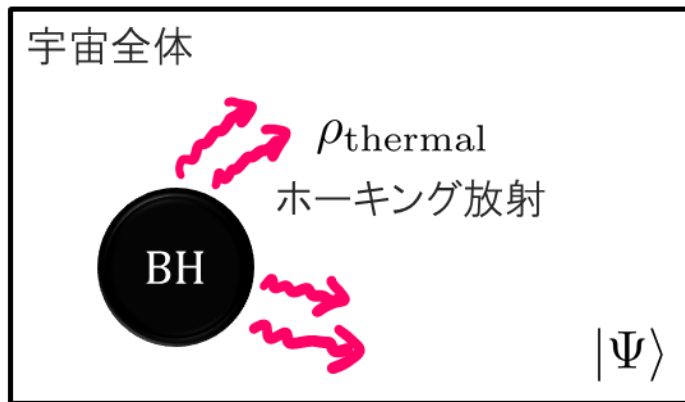
曲がった時空の場の量子論が予言すること

BHは「**熱的な放射＝ホーキング放射**」を放出する。つまり、BHのエネルギーは減少する。

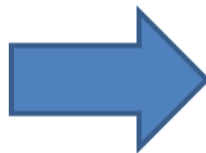
ブラックホールの情報パラドクス2



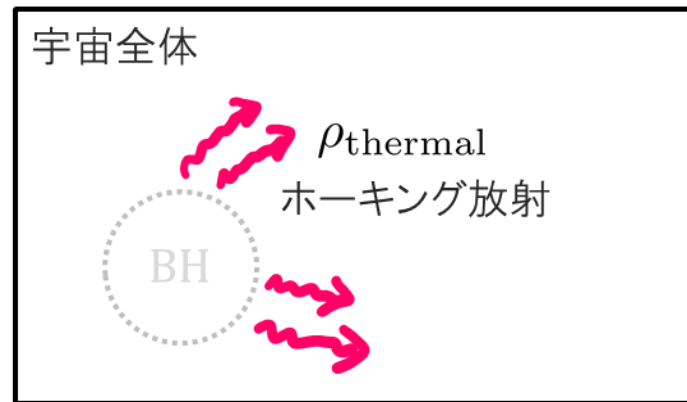
極めて単純化された宇宙と、ブラックホールを考える。



十分な時間の後



ユニタリ時間発展



この過程のはじめと最後だけを見ると...

純粋状態 $|\Psi\rangle$ から始まった宇宙が、最終的には熱的な混合状態 ρ_{thermal} になった。

BH内部の情報を持つ

BH内部の情報を持たない

ダイナミクスがユニタリ時間発展であることと矛盾！

ホーキング放射はBH内部の情報を持ち去る？持ち去らない？



ブラックホールの情報パラドクス3



ホーキング放射はBH内部の情報を持ち去る?持ち去らない?

一般相対論 + α を信じてと...

持ち去らない。つまり、**情報は喪失**する → BHでは量子論は成立しない

量子論を信じてと...

持ち去る。つまり、**情報は宇宙全体で保存**する → ホーキング放射 = 熱的と矛盾



S. Hawking

現在、多くの人が思っている(らしい)こと。
情報は保存するはず。その理解には「時空の量子化 = 量子重力理論」が不可欠。
つまり、**情報パラドクスは量子重力理論のテストピース**。

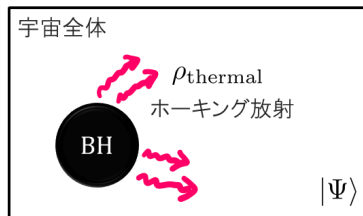


J. Preskill



P. Hayden

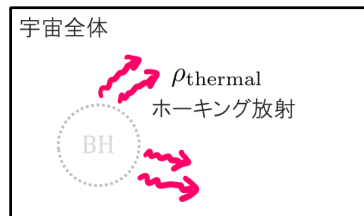
量子情報の観点から
考えてみよう!



十分な時間の後



ユニタリ時間発展



本講演の仮定・話すこと・話さないこと

量子情報と
ブラックホール

ホーキング放射はBH内部の情報を持ち去る?持ち去らない?

量子論的なBHのトイ・モデルを用いて、BH内部の情報復元について話す。

特に大きな仮定: BHは量子論で記述される。特に、「時間発展はユニタリ」

- 仮定より、ホーキング放射はBH内部の情報を持ち去るが、「どれくらいの速さ」で持ち去るか?
- どれくらいの量のホーキング放射を集めれば、BH内部の情報を復元できるのか?

重要だが、話さ(せ)ないこと

- BHに落ちていく観測者には何が見えるか? (BH相補性, BHファイアウォール, etc….)
- AdS/CFT対応・ホログラフィ原理・BHアイランドや、時空の幾何学の言葉への翻訳。

P. Hayden and J. Preskill, JHEP 0709:120 (2007).

