究極理論への夢

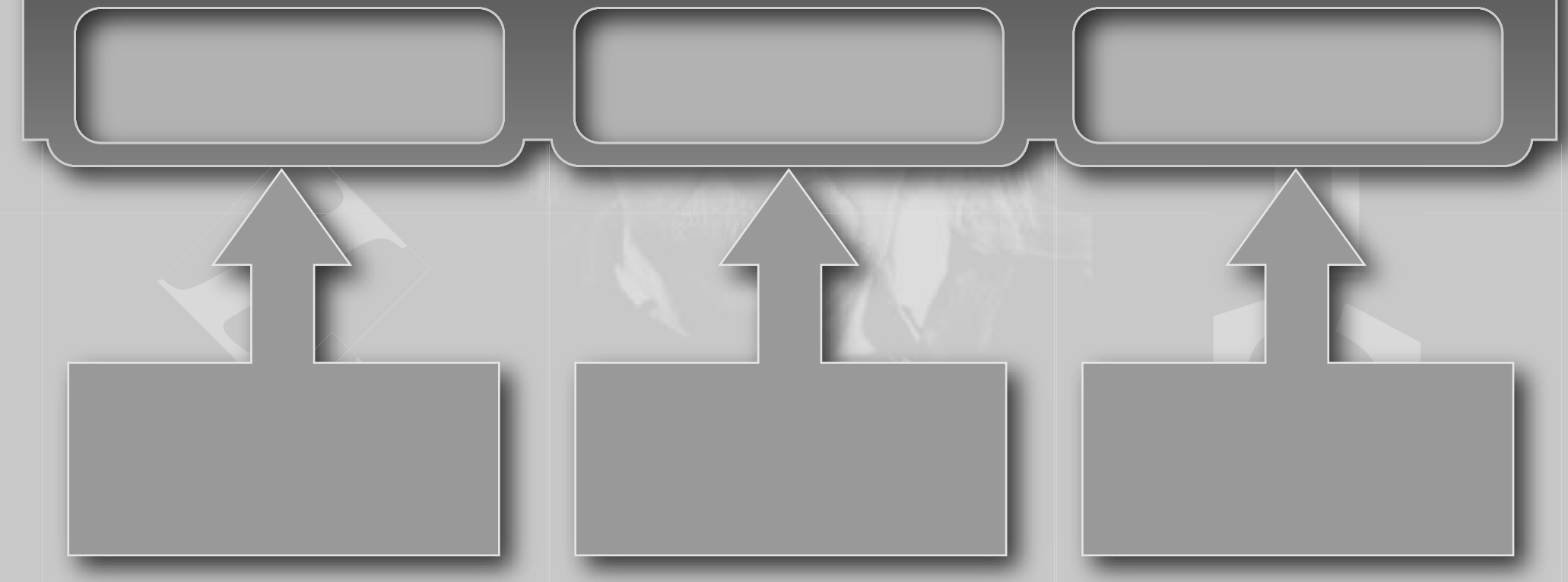
ー宇宙の本当の姿とは？ー

坂本眞人
素粒子理論研究室
神戸大学理学部物理学科

アインシュタイン

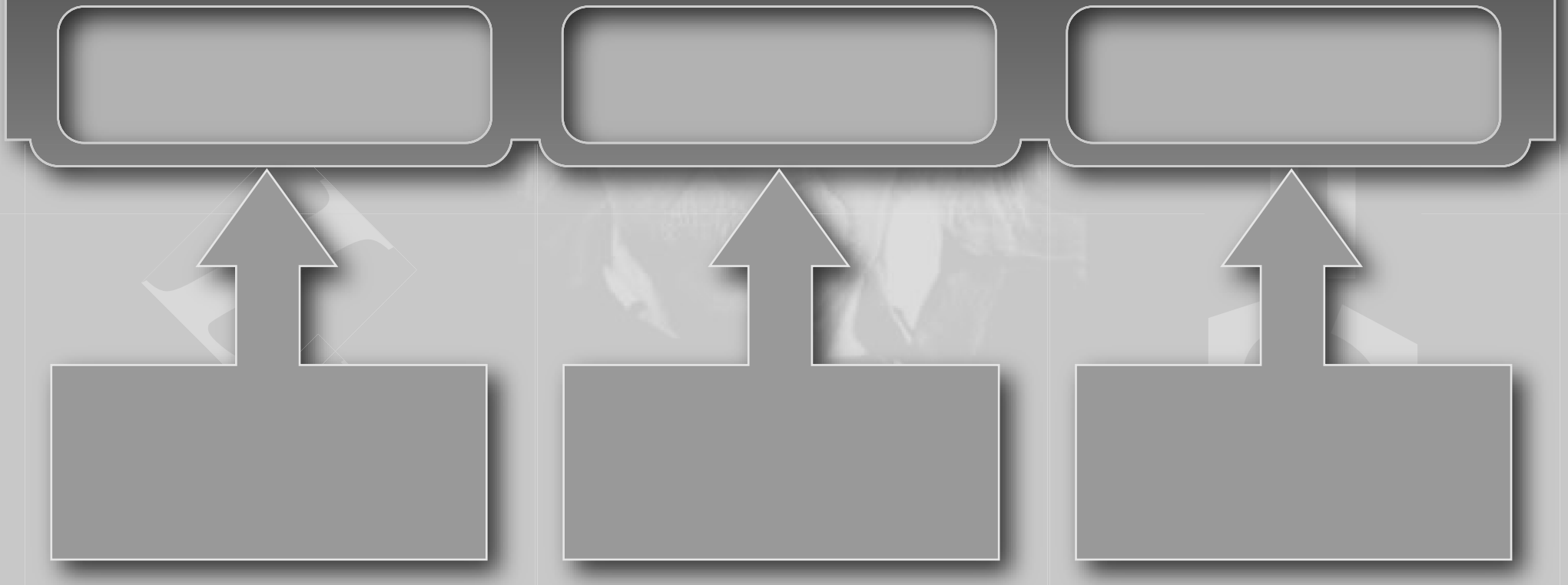
『宇宙を創造するとき、
神にはどれだけ選択
の余地があったのか？』

究極理論＝宇宙の全てを支配する法則



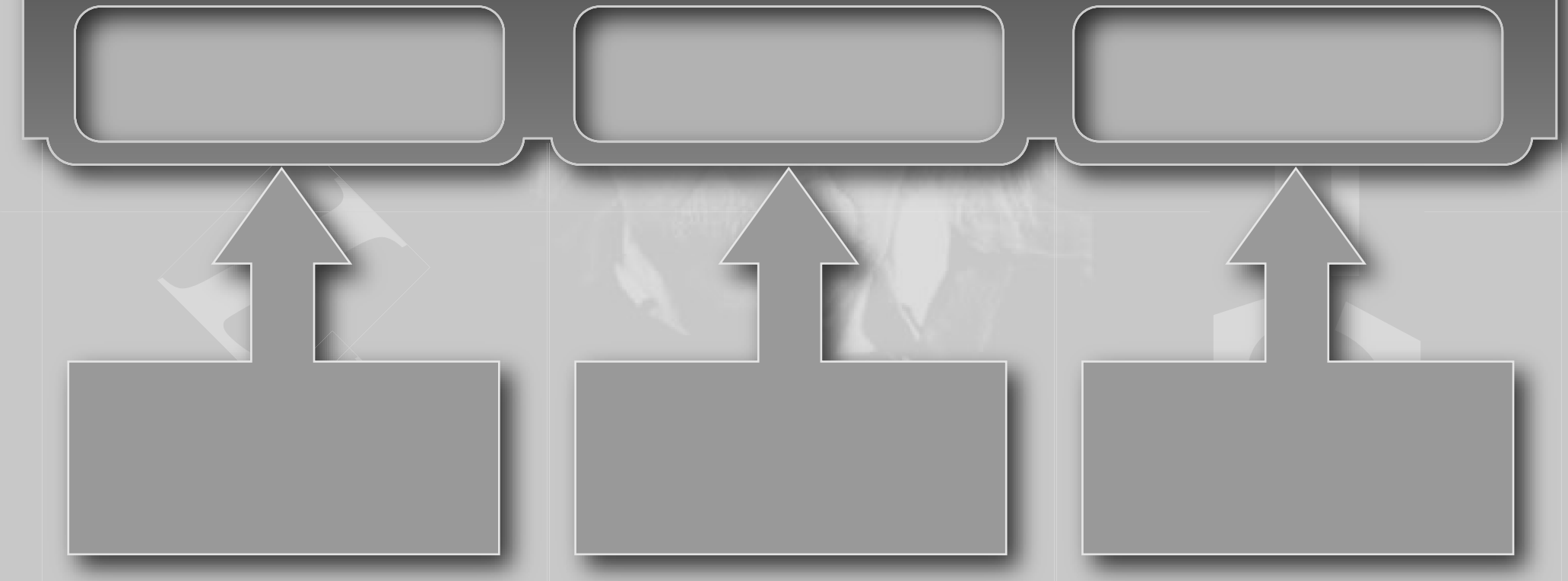
究極理論＝宇宙の全てを支配する法則

あるべき姿とは？

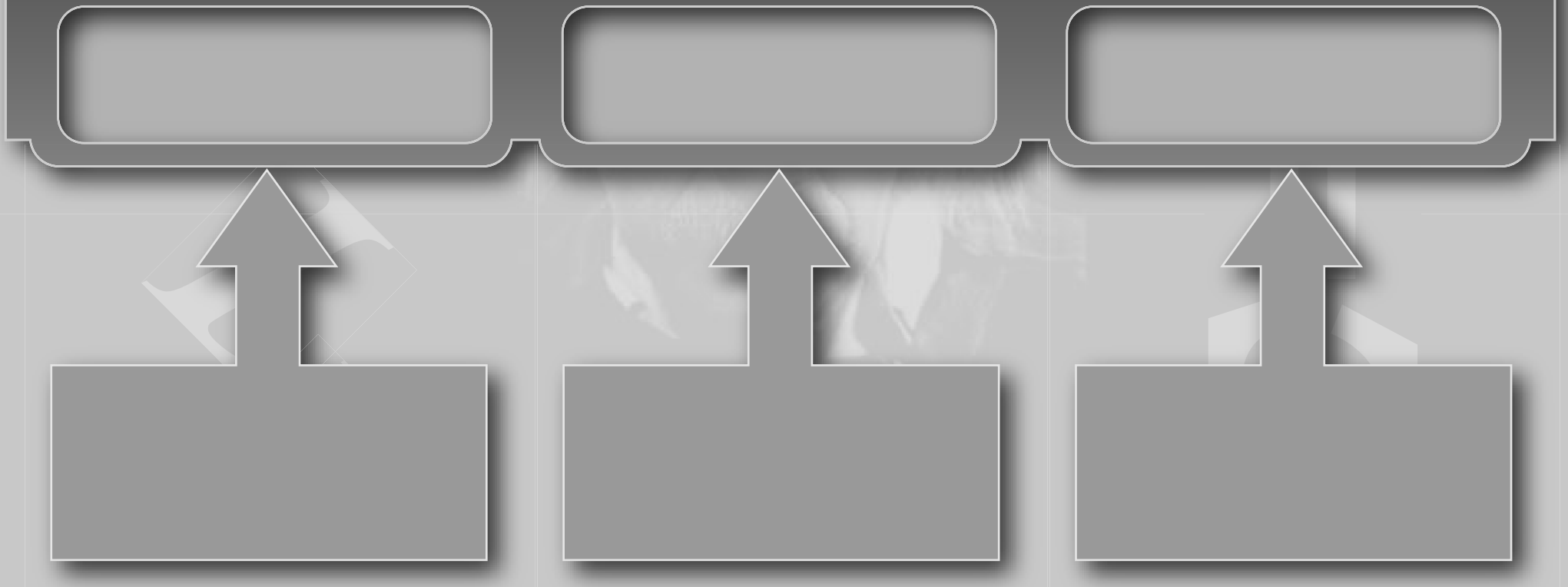


究極理論＝宇宙の全てを支配する法則

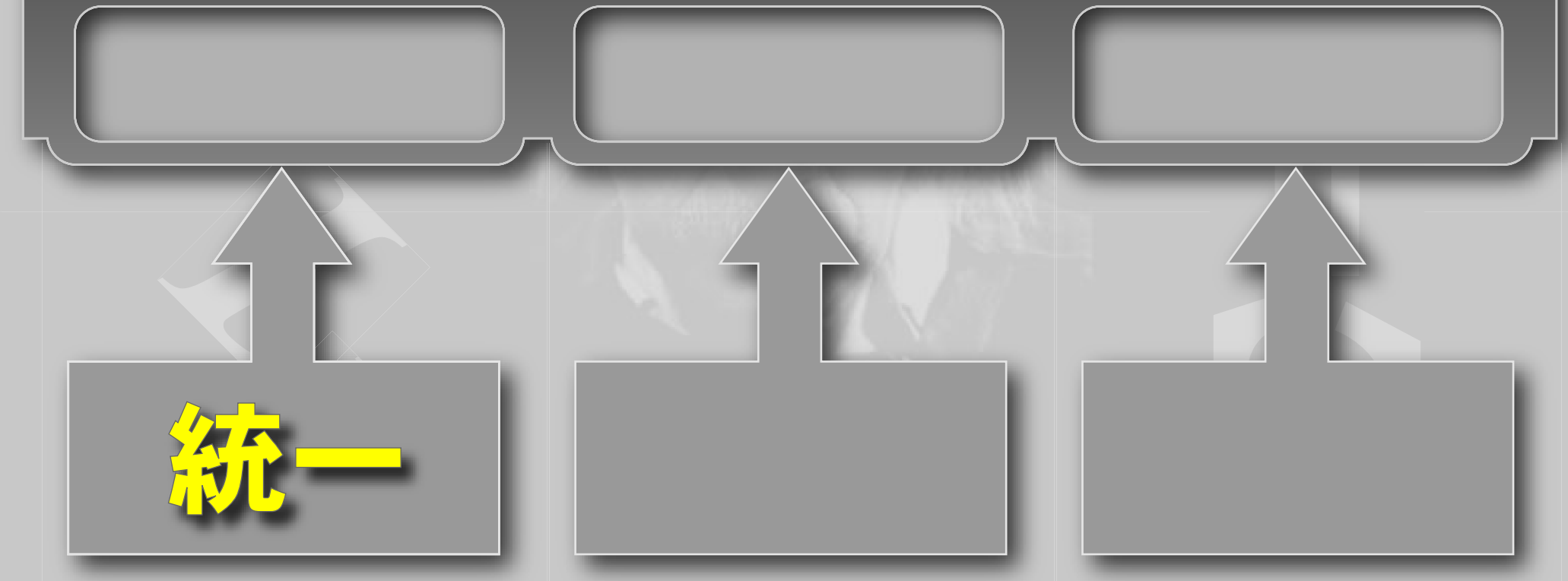
その候補は？



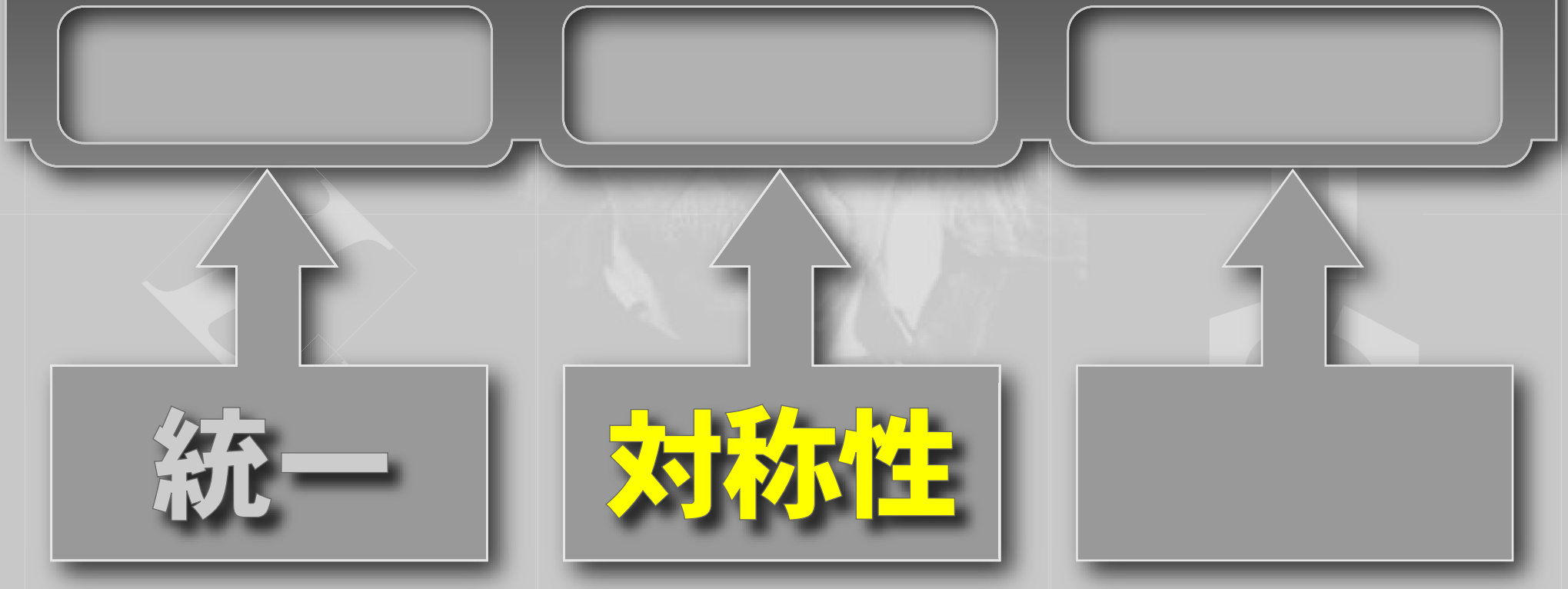
究極理論



究極理論



究極理論



究極理論

究極理論

素粒子の統一

統一

対称性

時空

究極理論

究極理論

素粒子の統一　　超対称性　　最小の長さ

統一　　対称性　　時空

究極理論

素粒子の統一　超対称性　最小の長さ

統一　対称性　時空

超弦理論???

素粒子の統一

超対称性

最小の長さ

統一

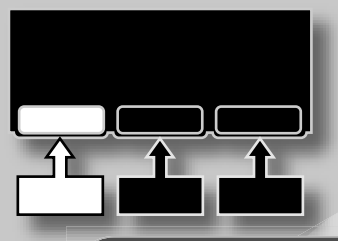
対称性

時空

究極理論

素粒子を制するものは宇宙を制す！

坂本眞人　サイエンスセミナー 2008年7月27日、ー究極理論への夢ー



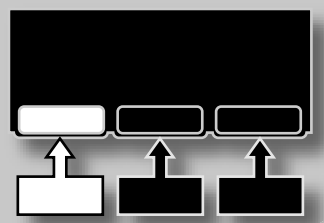
物質

力

時空

3つの
異なる概念!?

$E=mc^2$



統一的な見方は可能か？
万物の統一!?

物質

力

時空

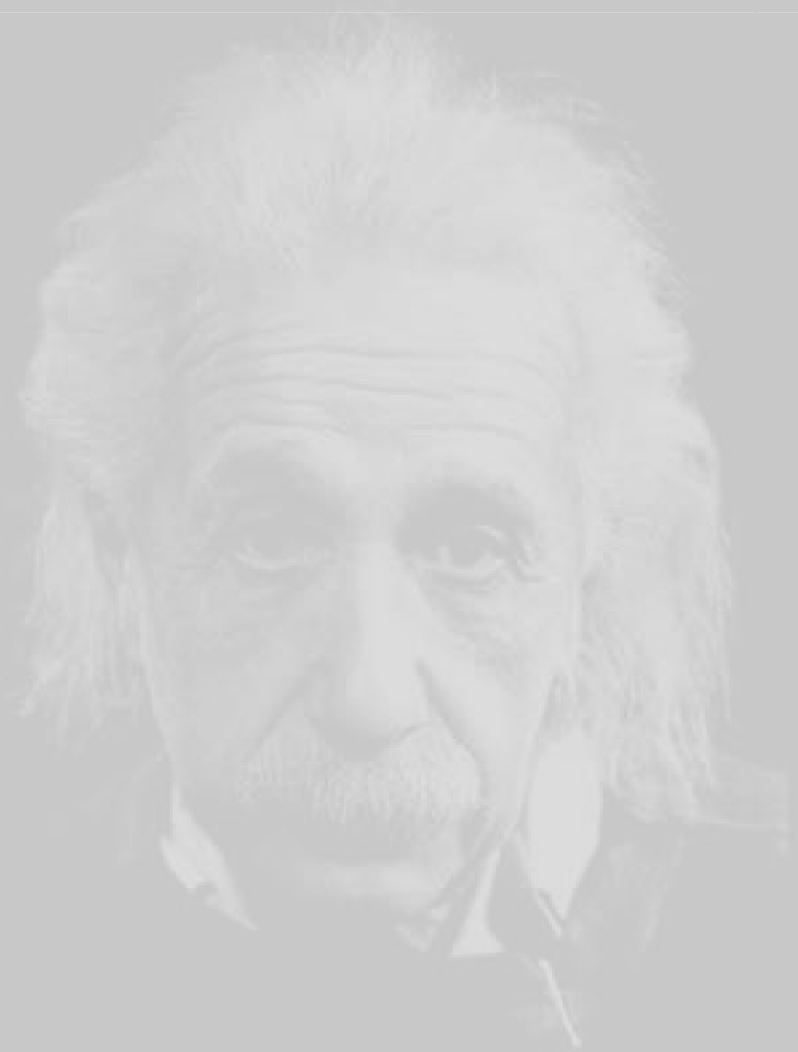
3つの
異なる概念!?

物質の統一？

物質

力

時空



$E=mc^2$

物質の統一？

物質

力

時空

塩

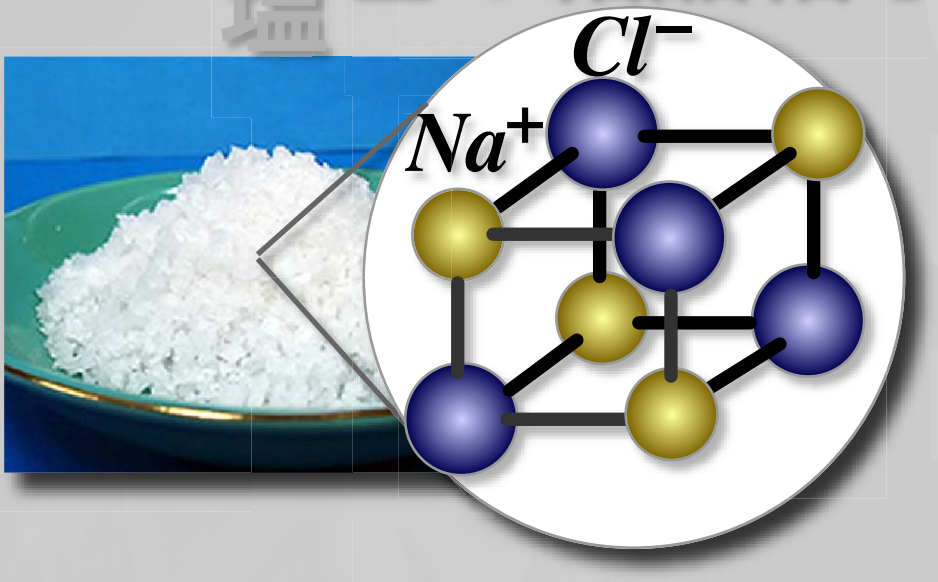
物質の統一？

物質

力

時空

塩の結晶格子



物質の統一？

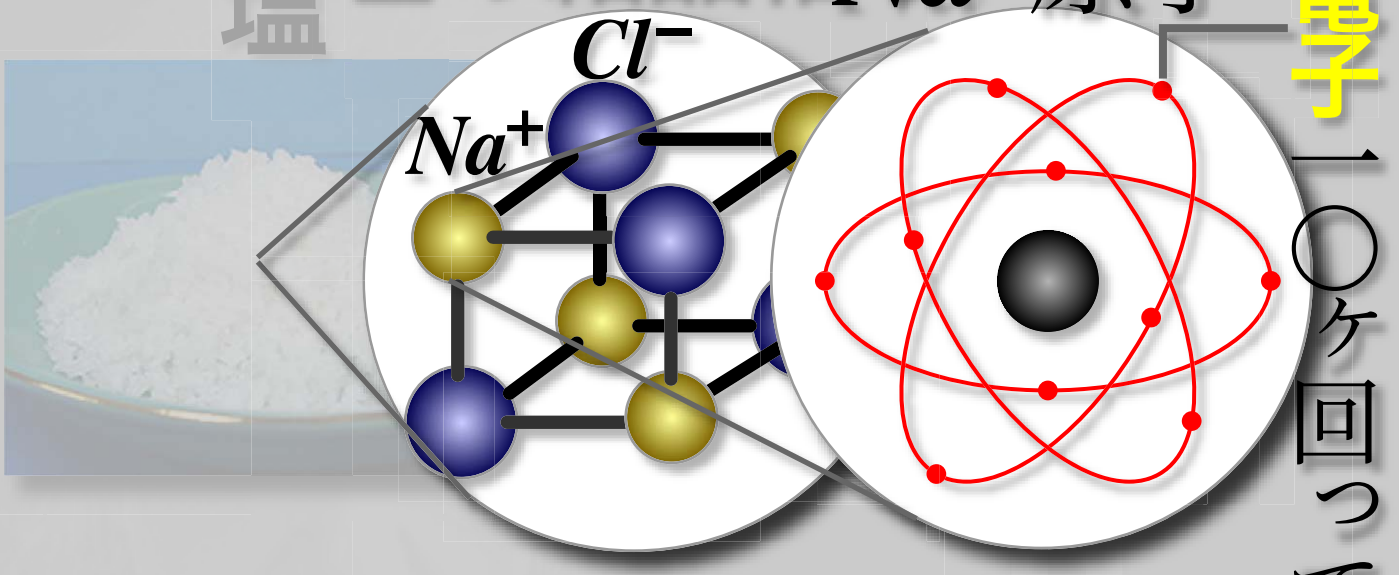
物質

力

時空

塩

塩の結晶格子



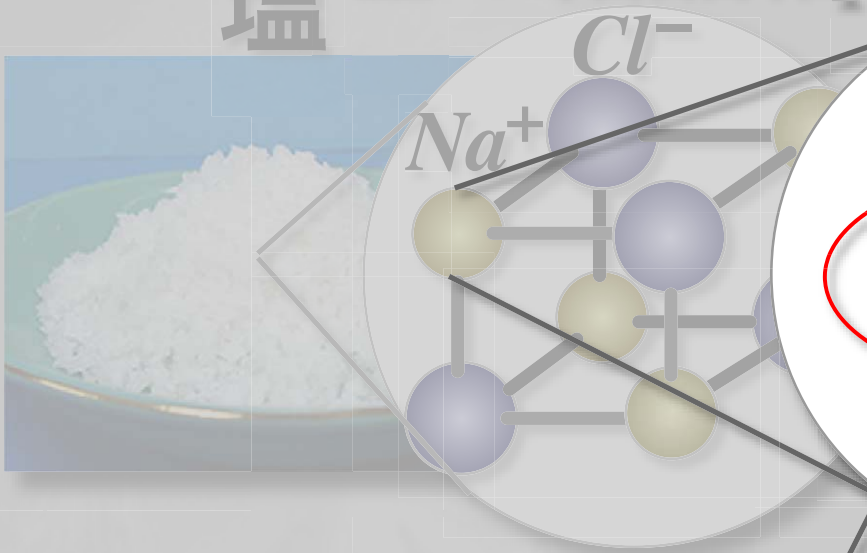
物質の統一？

物質

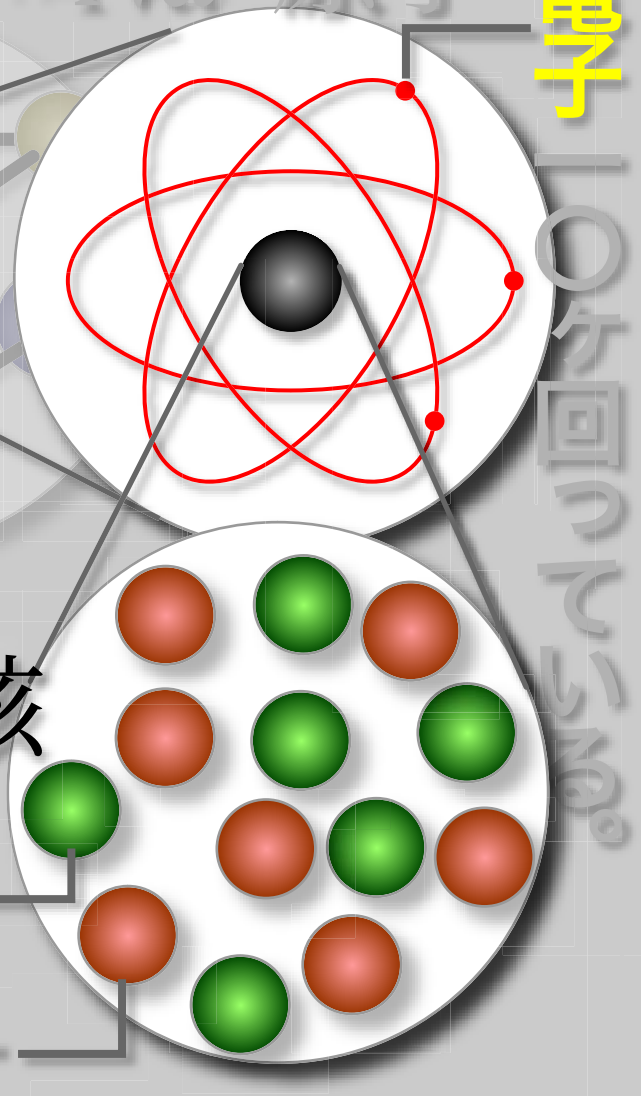
力

時空

塩の結晶格子



Na^+原子



***Na*の原子核**

陽子11ヶ

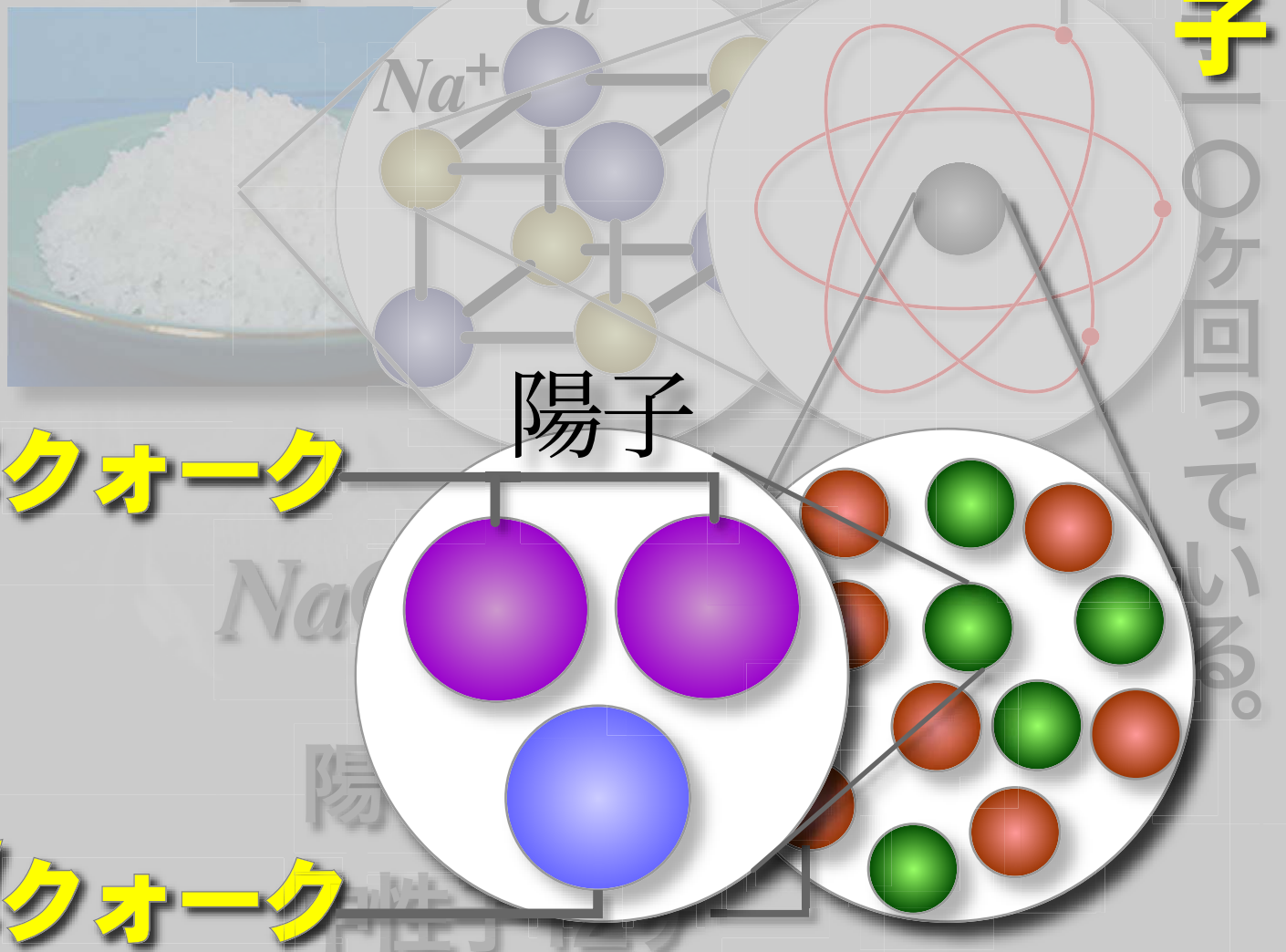
中性子12ヶ

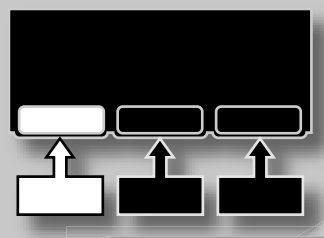
物質の統一？

物質

力

時空





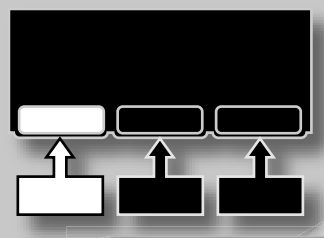
物質の統一？

物質

力

時空

自然界には、色、形、固さ、重さ、…など、物理的性質の異なる多種多様な物質/生物が存在！



物質の統一？

物質

力

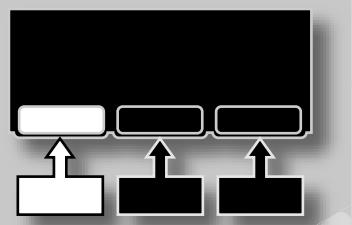
時空

自然界には、色、形、固さ、重さ、…など、物理的性質の異なる多種多様な物質/生物が存在！

ところがほとんどのものはたった3つの粒子が組合わさって作られている！

電子、uクォーク、dクォーク

e　　u　　d



物質の統一？

物質

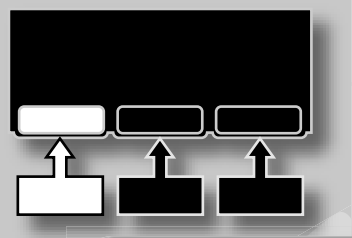
力

時空

神様は、人類が
『神様は存在するのか？』
と問うことを初めから
知っていたのか？

電子、uクォーク、dクォーク

e　u　d

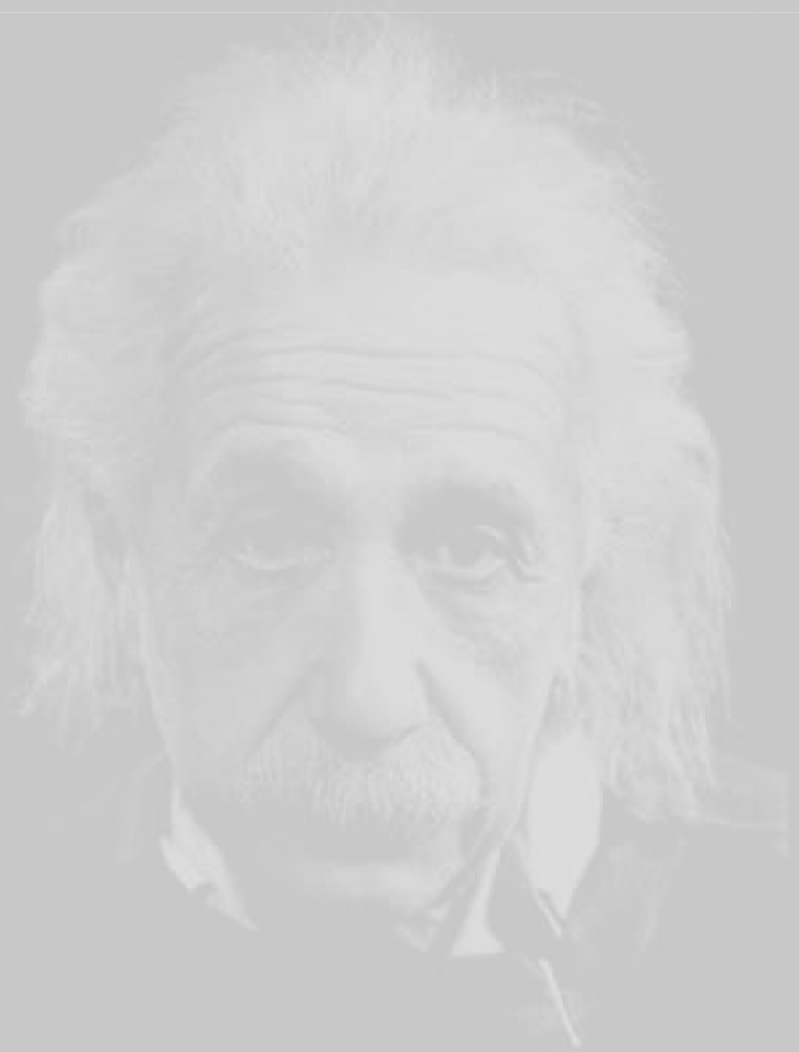


力の統一？

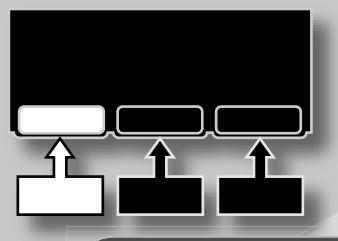
物質

力

時空



$E=mc^2$



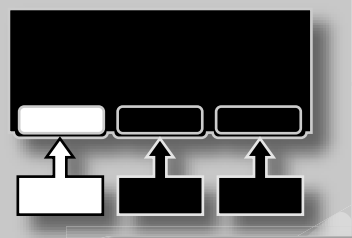
力の統一？

物質

力

時空

現在知られている力		強さの比
電磁力	電荷や磁石の間に働く力。日常生活の中で重力以外で感じる力はすべてこれ！	1
弱い力	原子核のベータ崩壊。中性子の崩壊。特にニュートリノが絡む反応。	$\frac{1}{1000}$
強い力	原子核内の陽子や中性子を結びつける力。クォーク間に働く力。	100
重力	質量/エネルギーの間に働く力。	$\frac{1}{10^{36}}$



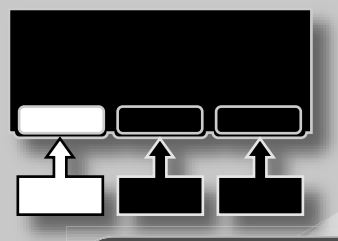
力の統一？

物質

力

時空

現在知られている力		強さの比
電磁力	電荷や磁石の間に働く力。日常生活の中で重力以外で感じる力はすべてこれ！	1
弱い力	原子核のベータ崩壊。中性子の崩壊。特にニュートリノが絡む反応。	$\frac{1}{1000}$
強い力	原子核内の陽子や中性子を結びつける力。クォーク間に働く力。	100
重力	質量/エネルギーの間に働く力。	$\frac{1}{10^{36}}$



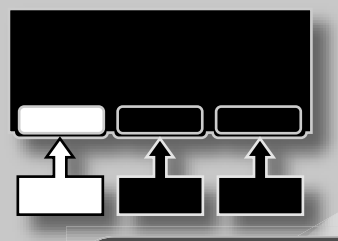
力の統一？

物質

力

時空

現在知られている力		強さの比
電磁力	電荷や磁石の間に働く力。日常生活の中で重力以外で感じる力はすべてこれ！	1
弱い力	原子核のベータ崩壊。中性子の崩壊。特にニュートリノが絡む反応。	$\frac{1}{1000}$
強い力	原子核内の陽子や中性子を結びつける力。クォーク間に働く力。	100
重力	質量/エネルギーの間に働く力。	$\frac{1}{10^{36}}$



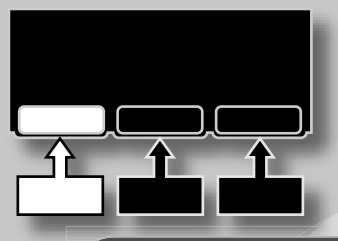
力の統一？

物質

力

時空

現在知られている力		強さの比
電磁力	電荷や磁石の間に働く力。日常生活の中で重力以外で感じる力はすべてこれ！	1
弱い力	原子核のベータ崩壊。中性子の崩壊。特にニュートリノが絡む反応。	$\frac{1}{1000}$
強い力	原子核内の陽子や中性子を結びつける力。クォーク間に働く力。	100
重力	質量/エネルギーの間に働く力。	$\frac{1}{10^{36}}$



力の統一？

物質

力

時空

電磁力

弱い力

強い力

重力

ワインバーグ・サラム理論

電弱理論として統一

全く性質の異なる力
が統一されるとは??

電磁力	弱い力
1	1/1000
長距離力	短距離力
日常的な力	日常とは無縁

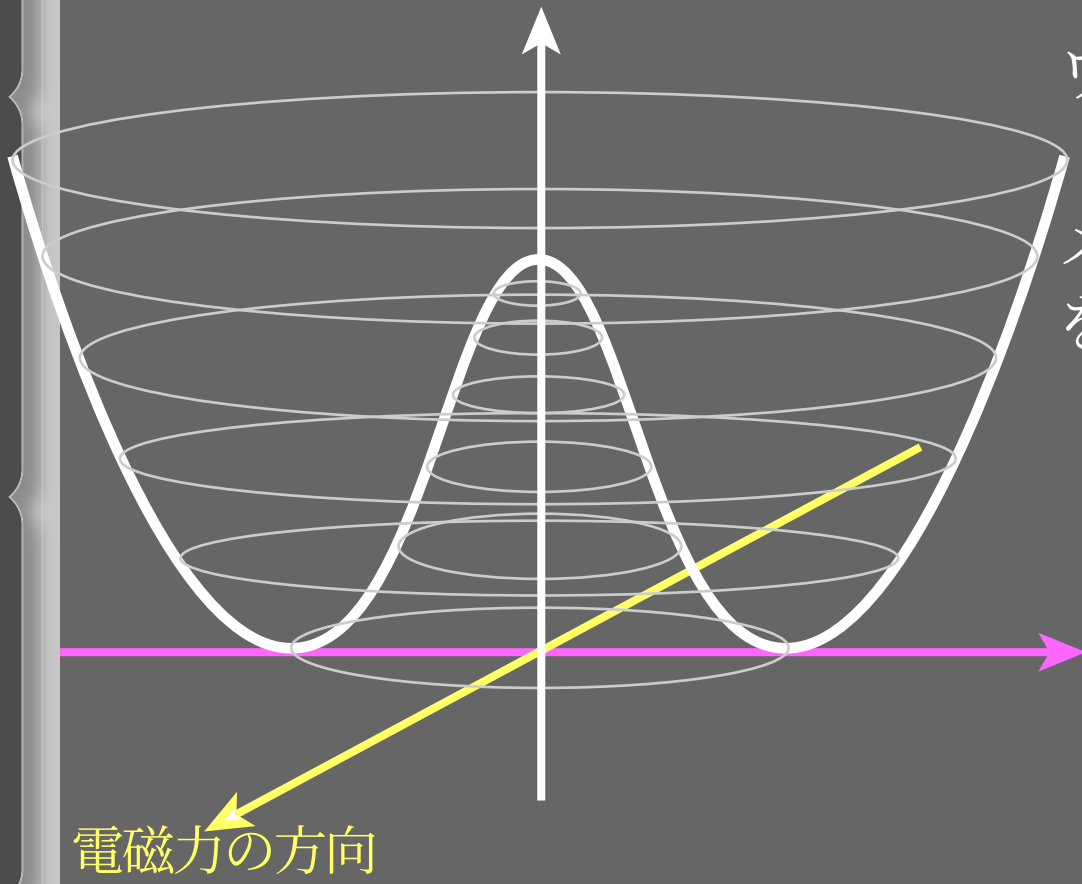
力の統一？

物質

力

時空

異なる力の統一のアイデア
— 対称性の破れ —



ワインボトルの底
あるいは、
メキシカンハット
を想像してみよう。

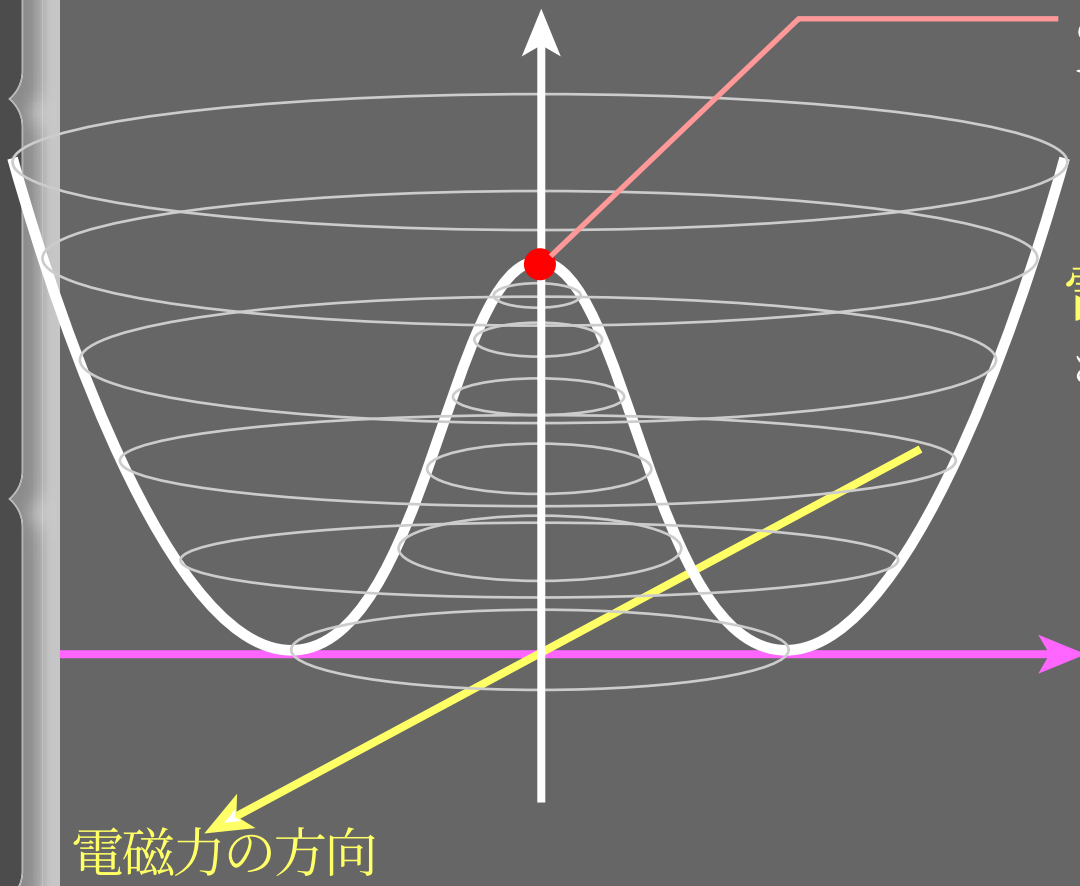
力の統一？

物質

力

時空

異なる力の統一のアイデア
— 対称性の破れ —



中心から見渡すとどの方角も同じ形に見える。

↓

電磁力も弱い力も全く同等！

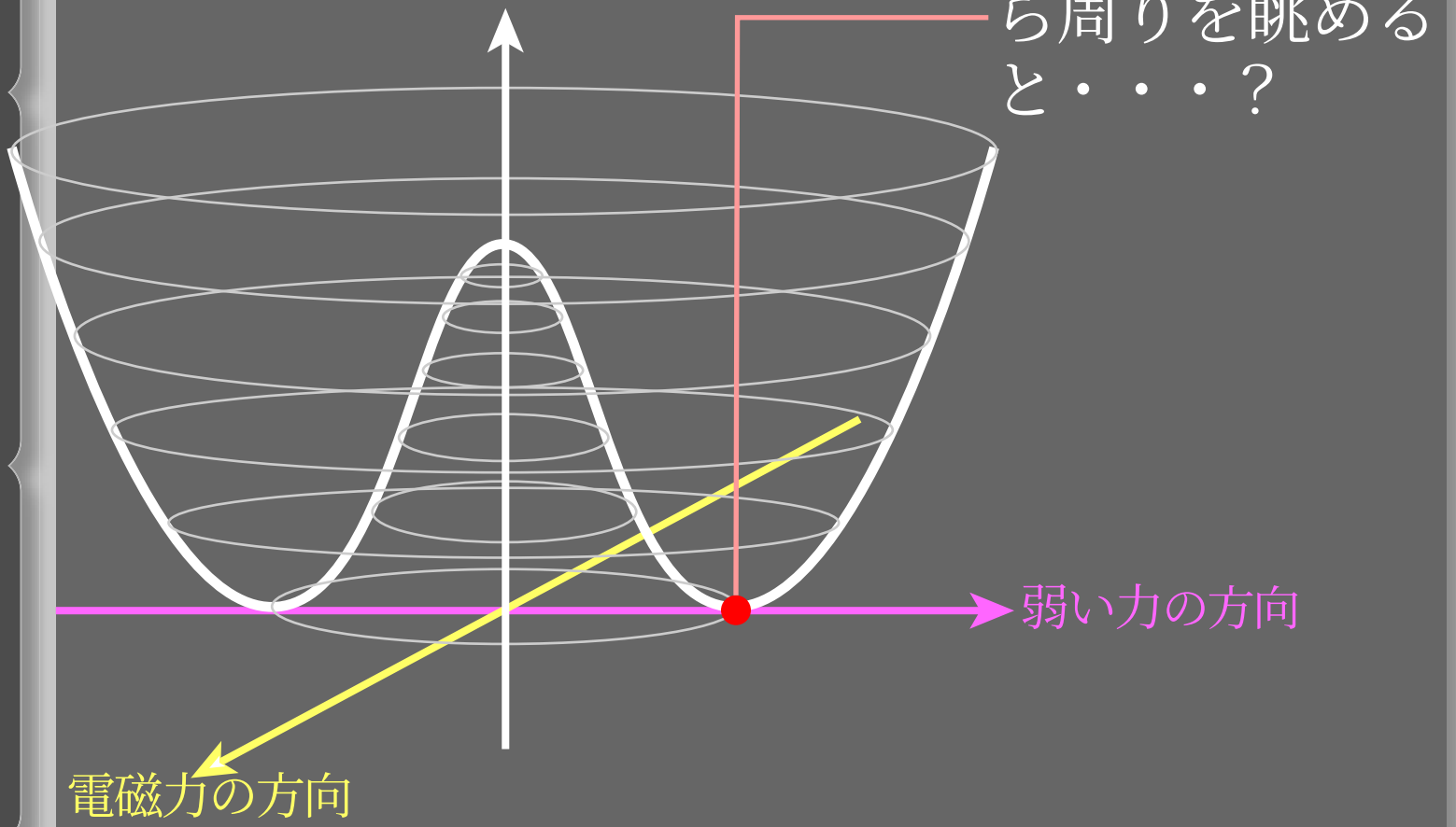
力の統一？

物質

力

時空

異なる力の統一のアイデア
— 対称性の破れ —



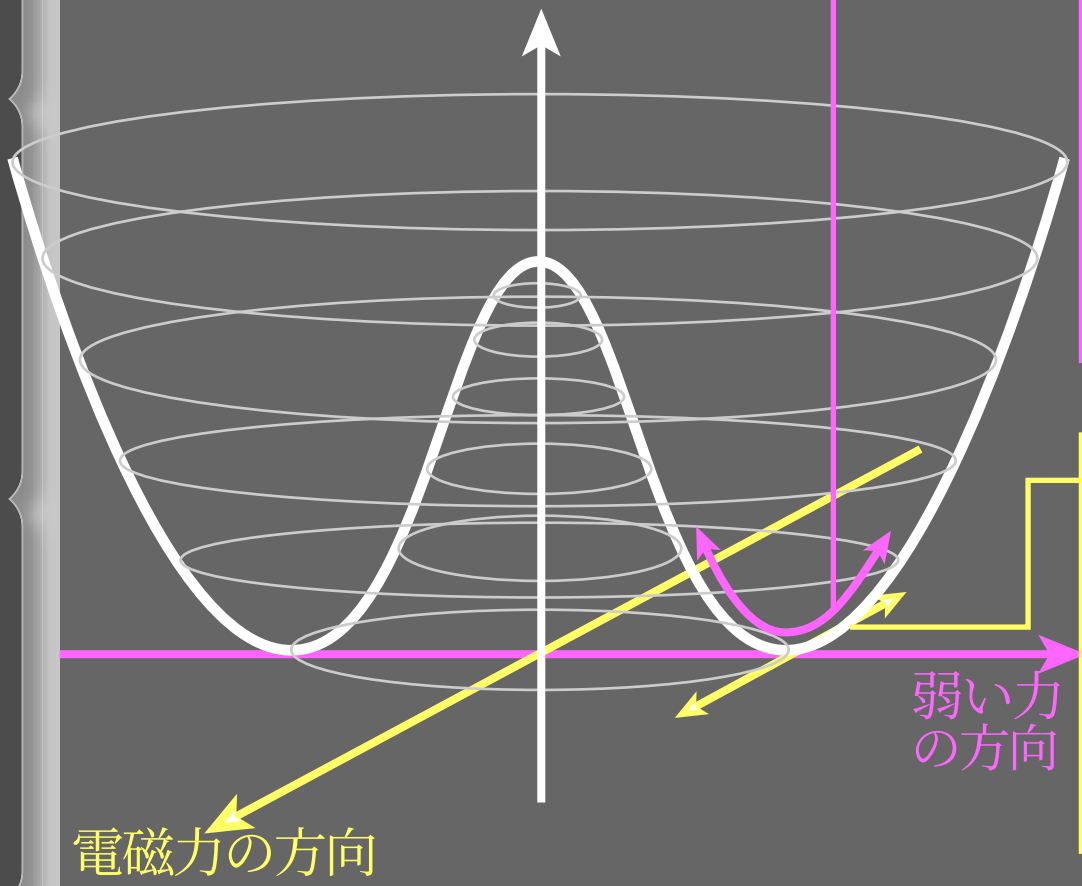
力の統一？

物質

力

時空

異なる力の統一のアイデア
ー 対称性の破れ ー



この方向は急な上り坂になっているため動きにくい。
→ 短距離力
→ 弱い力

この方向は平らなので簡単に動ける。
→ 長距離力
→ 電磁力

力の統一？

物質

力

時空

電磁力

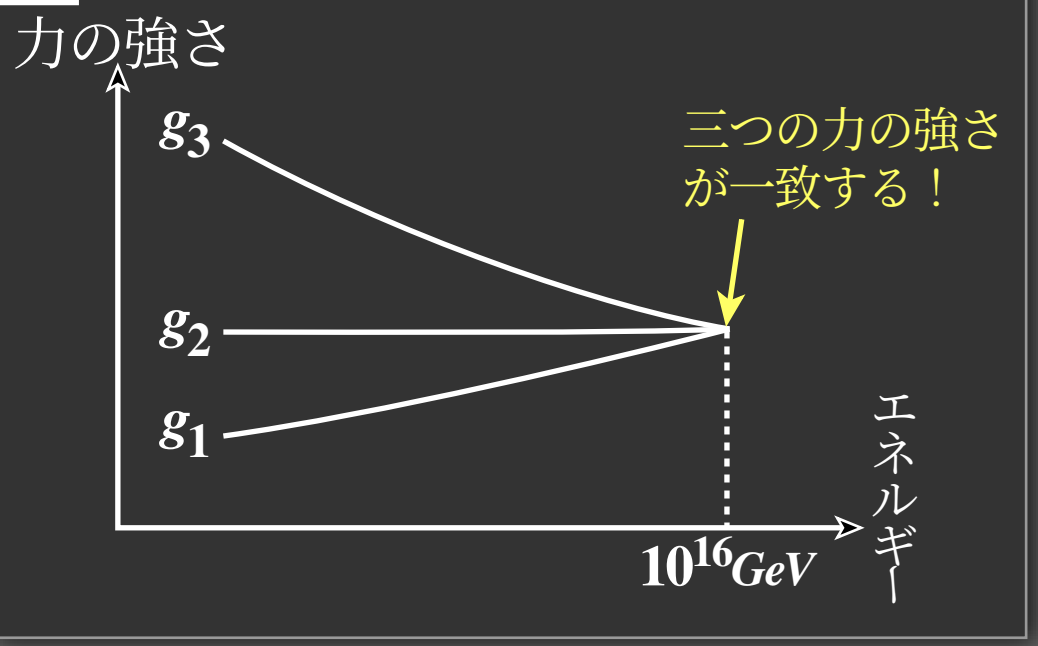
弱い力

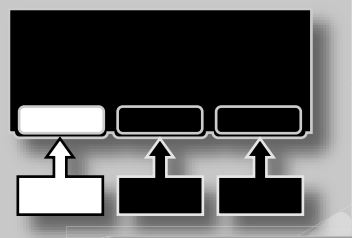
強い力

重力

大統一理論
Grand Unified Theory

三つの力の統一の状況証拠





力の統一？

物質

力

時空

電磁力

弱い力

強い力

重力

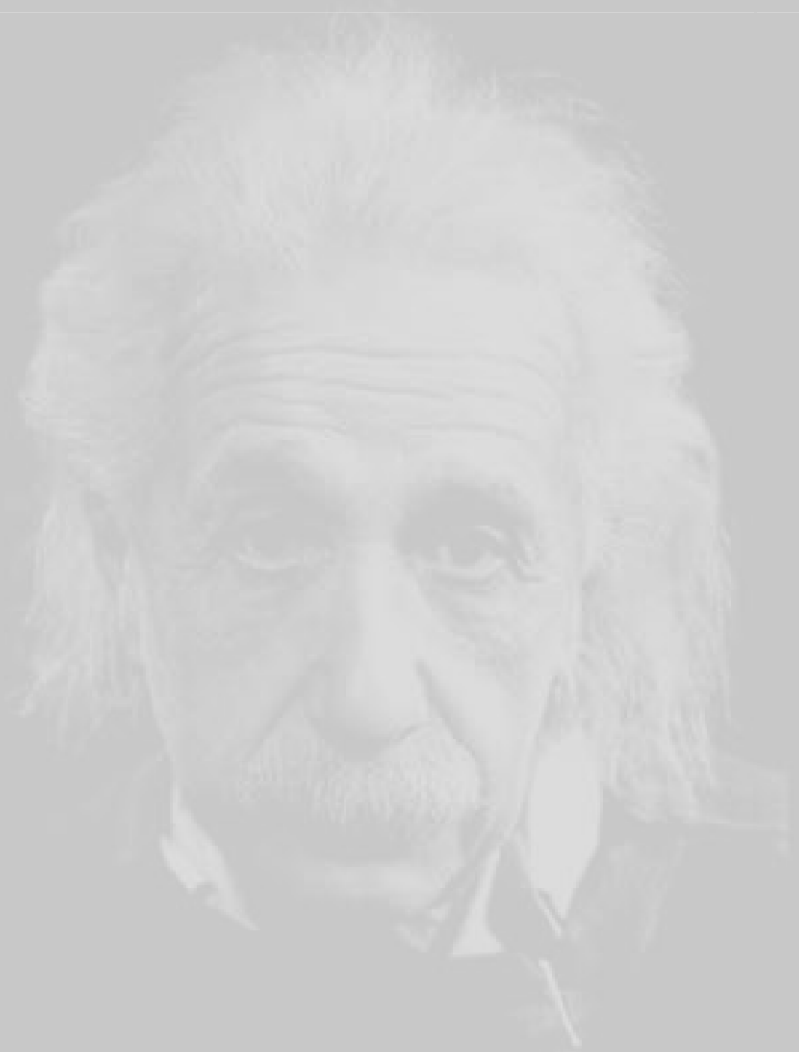
Kaluza-Klein Theory
???

時空の統一？

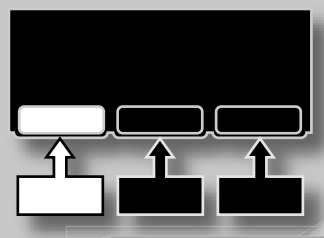
物質

力

時空



$E=mc^2$



時空の統一？

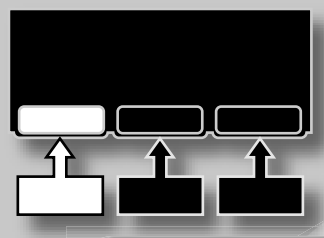
物質

力

時空

特殊相対性理論(アインシュタイン,1905)

それまで独立に存在していると思われていた時間と空間を統一



時空の統一？

物質

力

時空

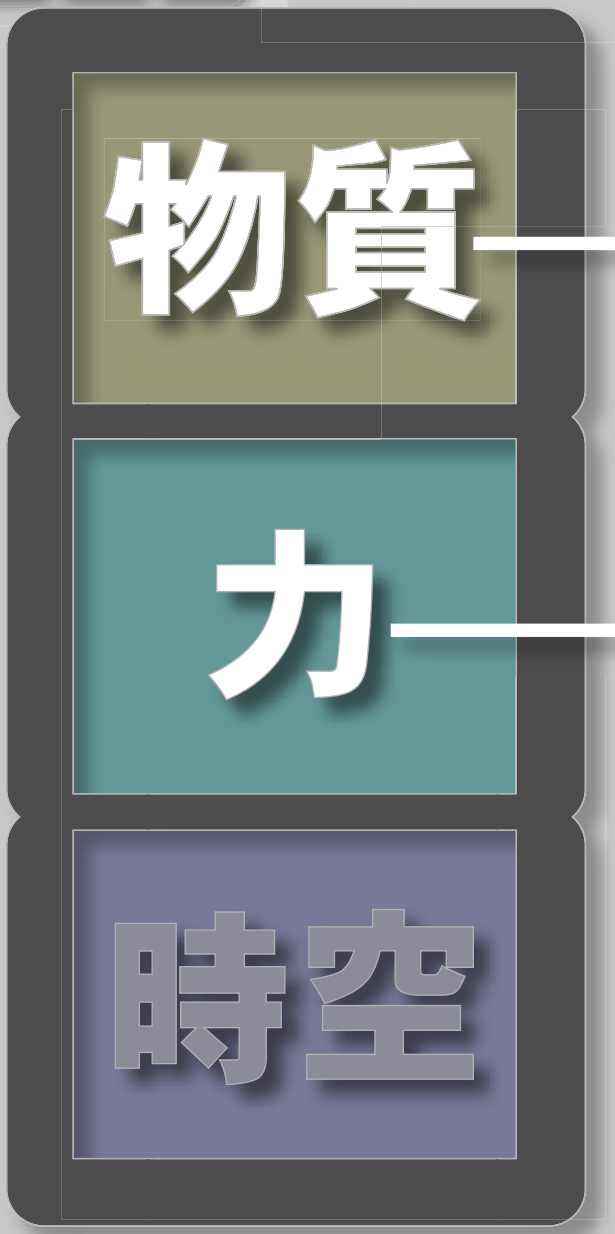
特殊相対性理論(アインシュタイン,1905)

それまで独立に存在していると思われていた時間と空間を統一

$$x^\mu = \begin{pmatrix} x^0 \\ x^1 \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

物理法則の中には必ずx^μ (μ=0,1,2,3)のまとまりで現れる！

現代物理学における"力"とは？



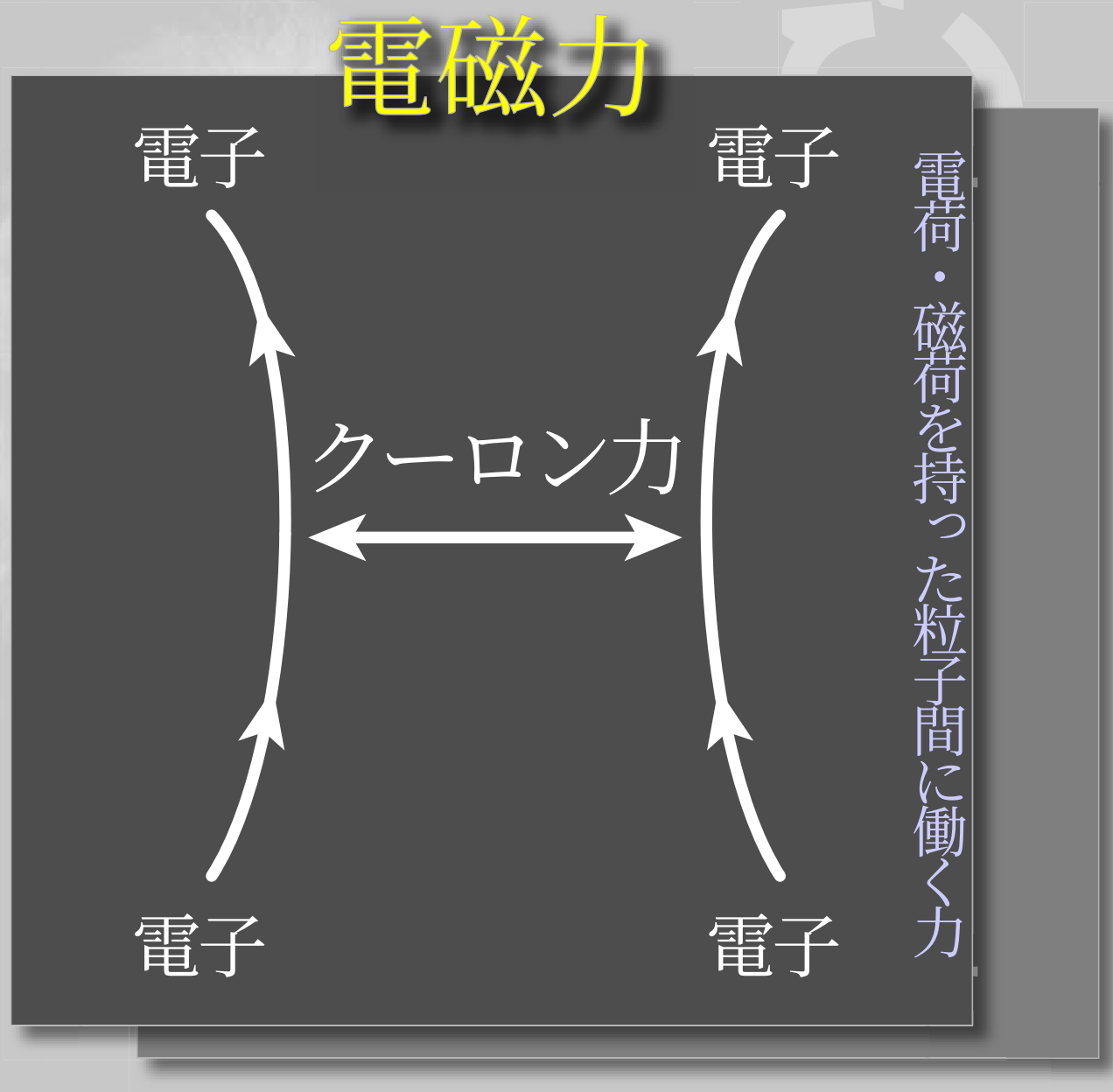
物質と力の統一

現代物理学における"力"とは？

物質

力

時空

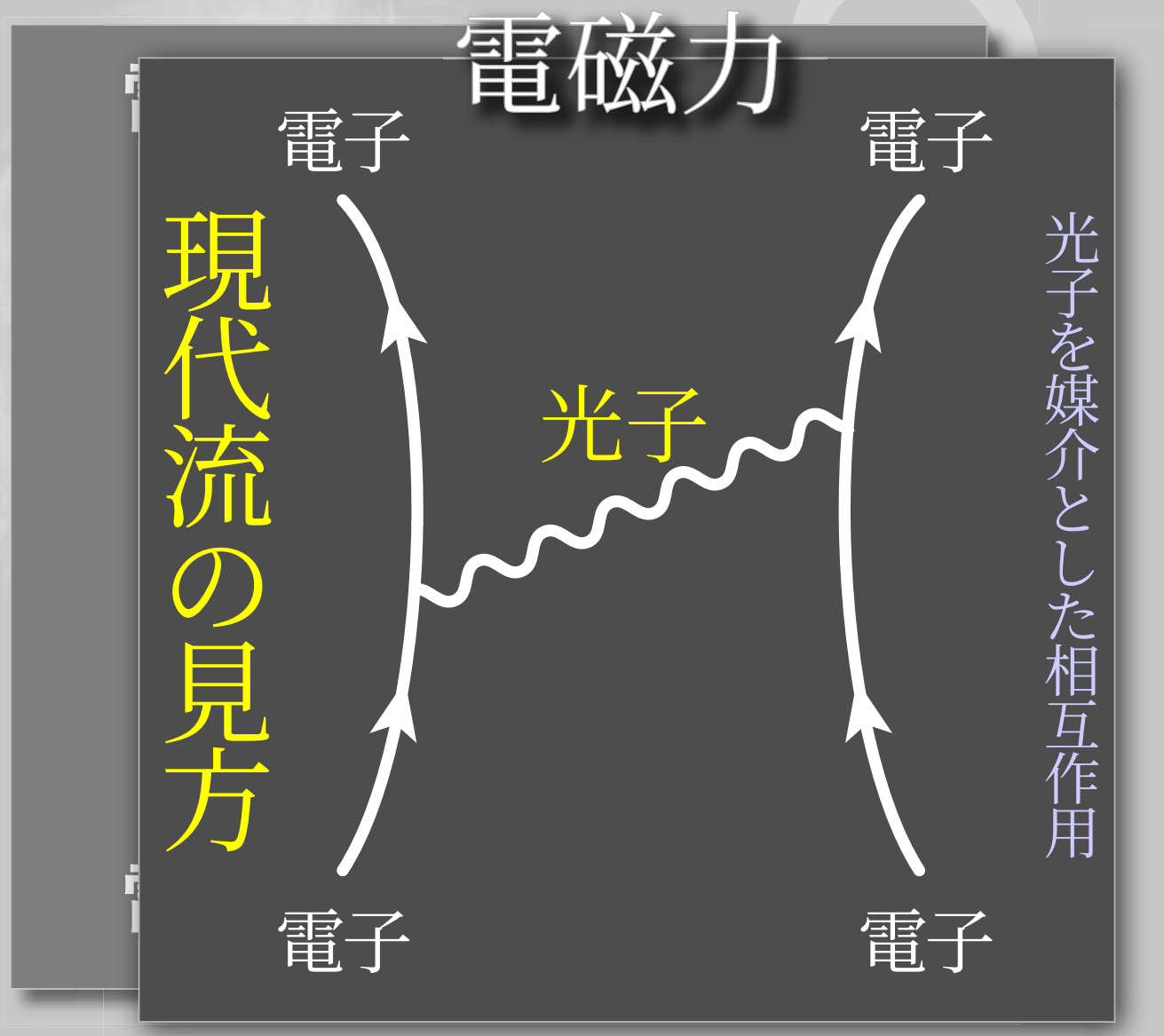


現代物理学における"力"とは？

物質

力

時空

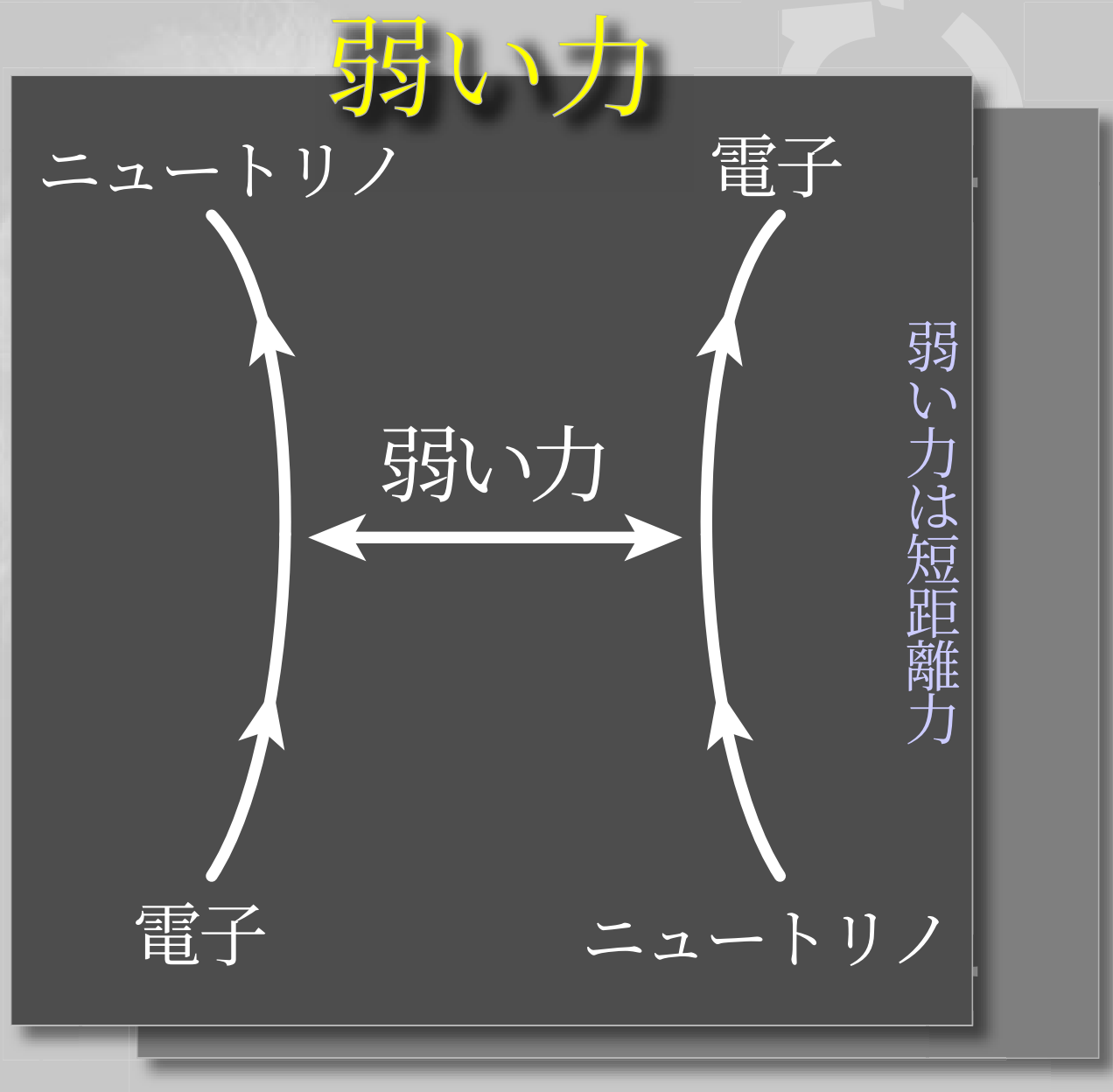


現代物理学における"力"とは？

物質

力

時空

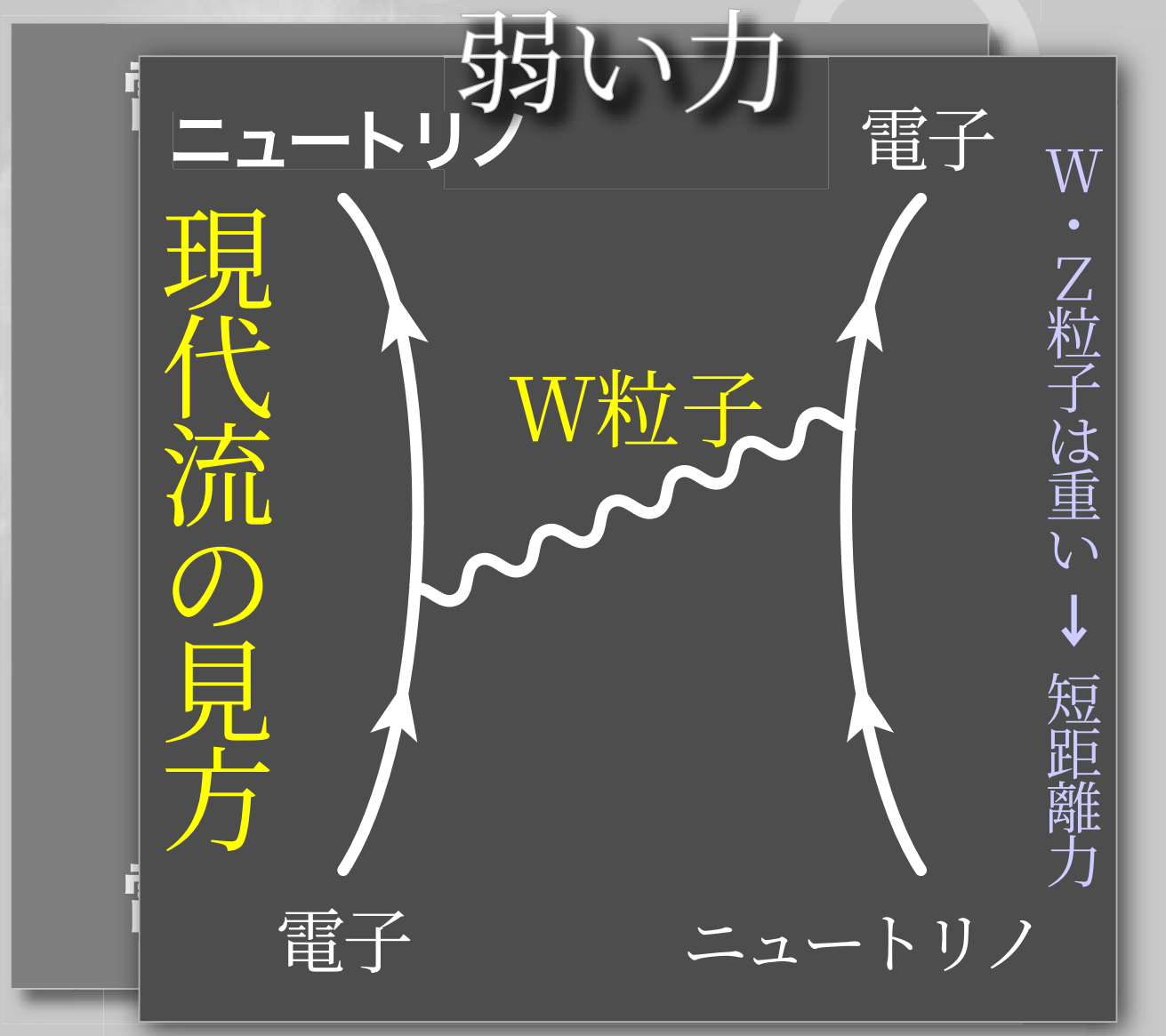


現代物理学における"力"とは？

物質

力

時空

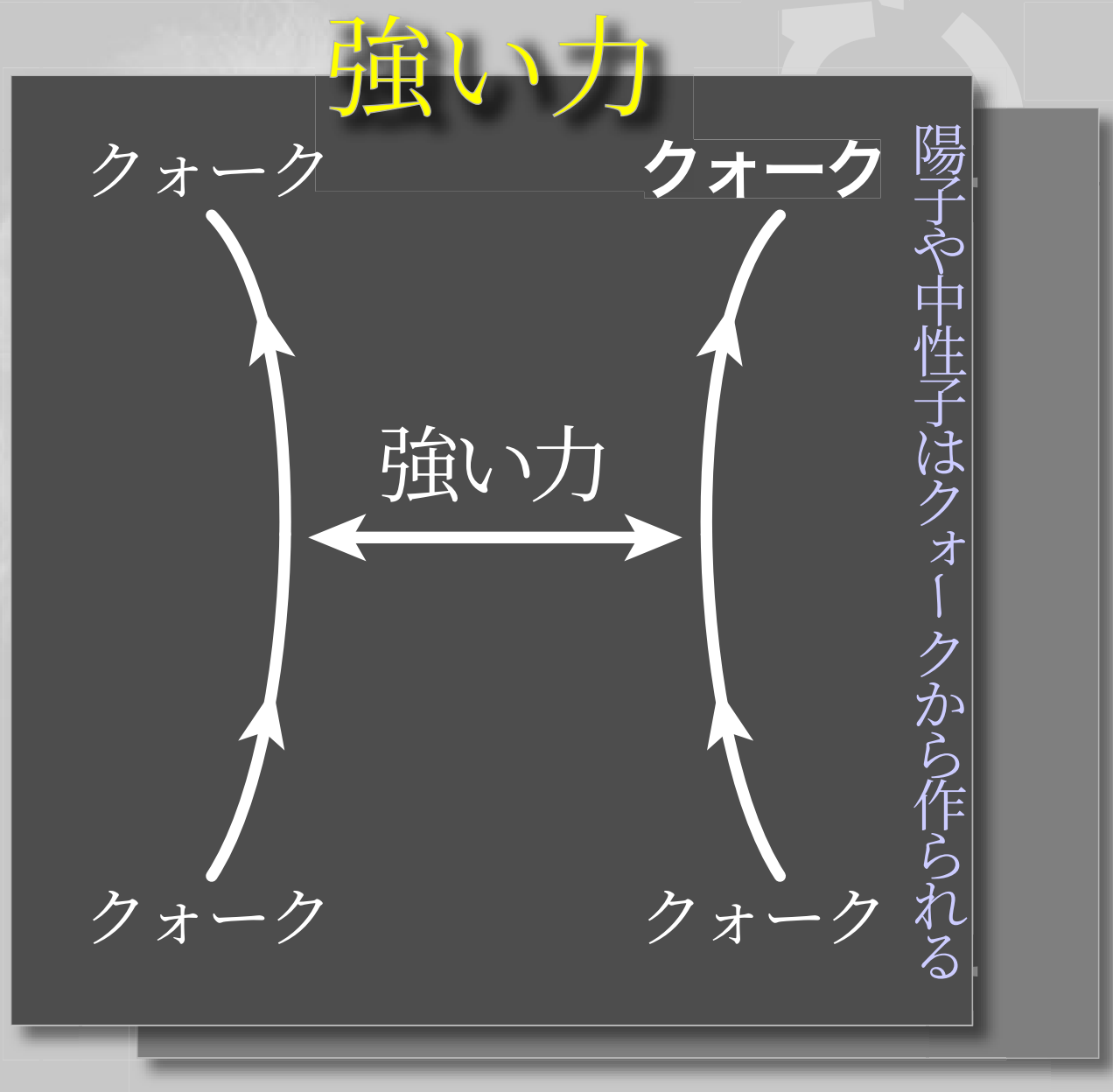


現代物理学における"力"とは？

物質

力

時空

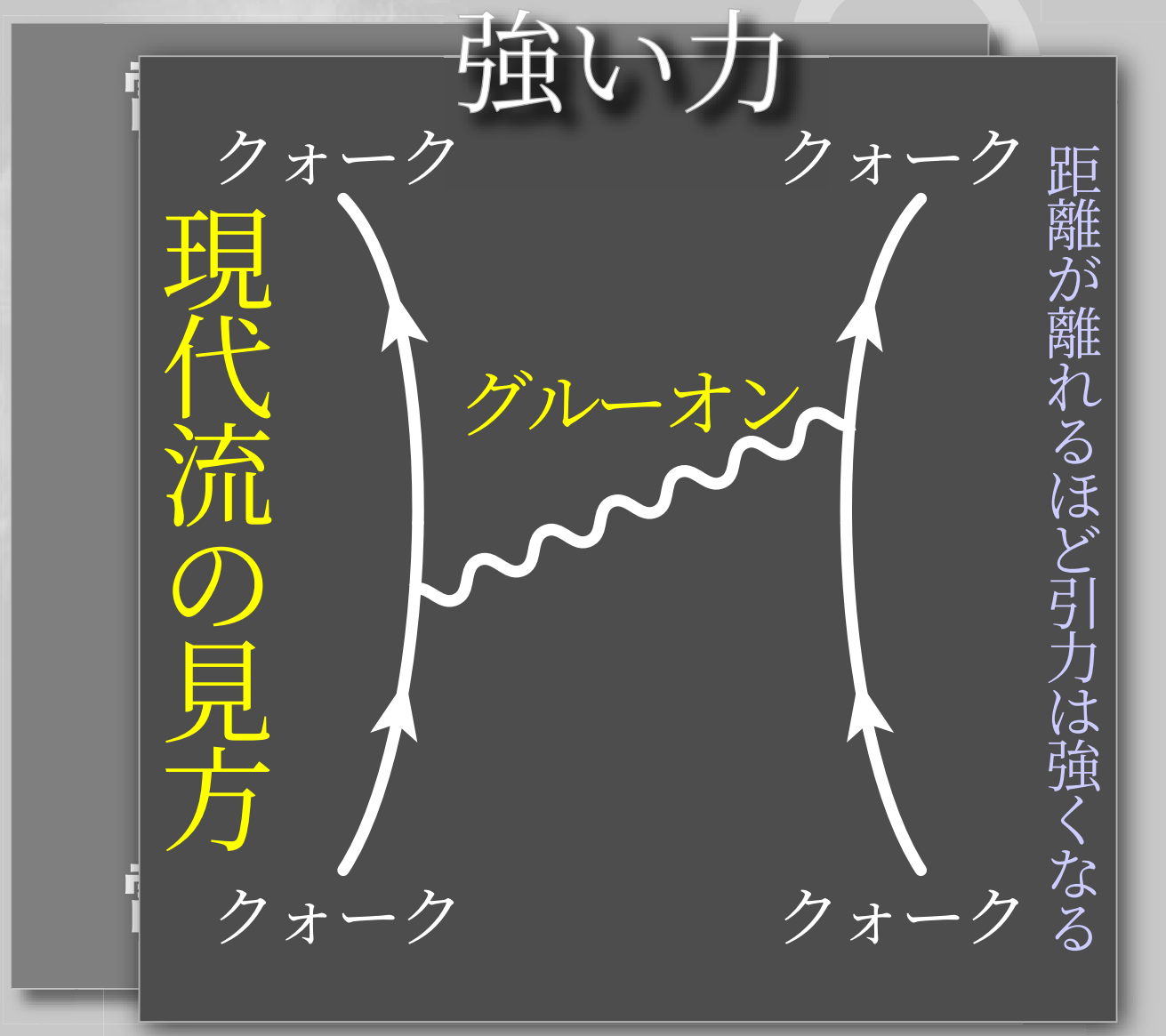


現代物理学における"力"とは？

物質

力

時空

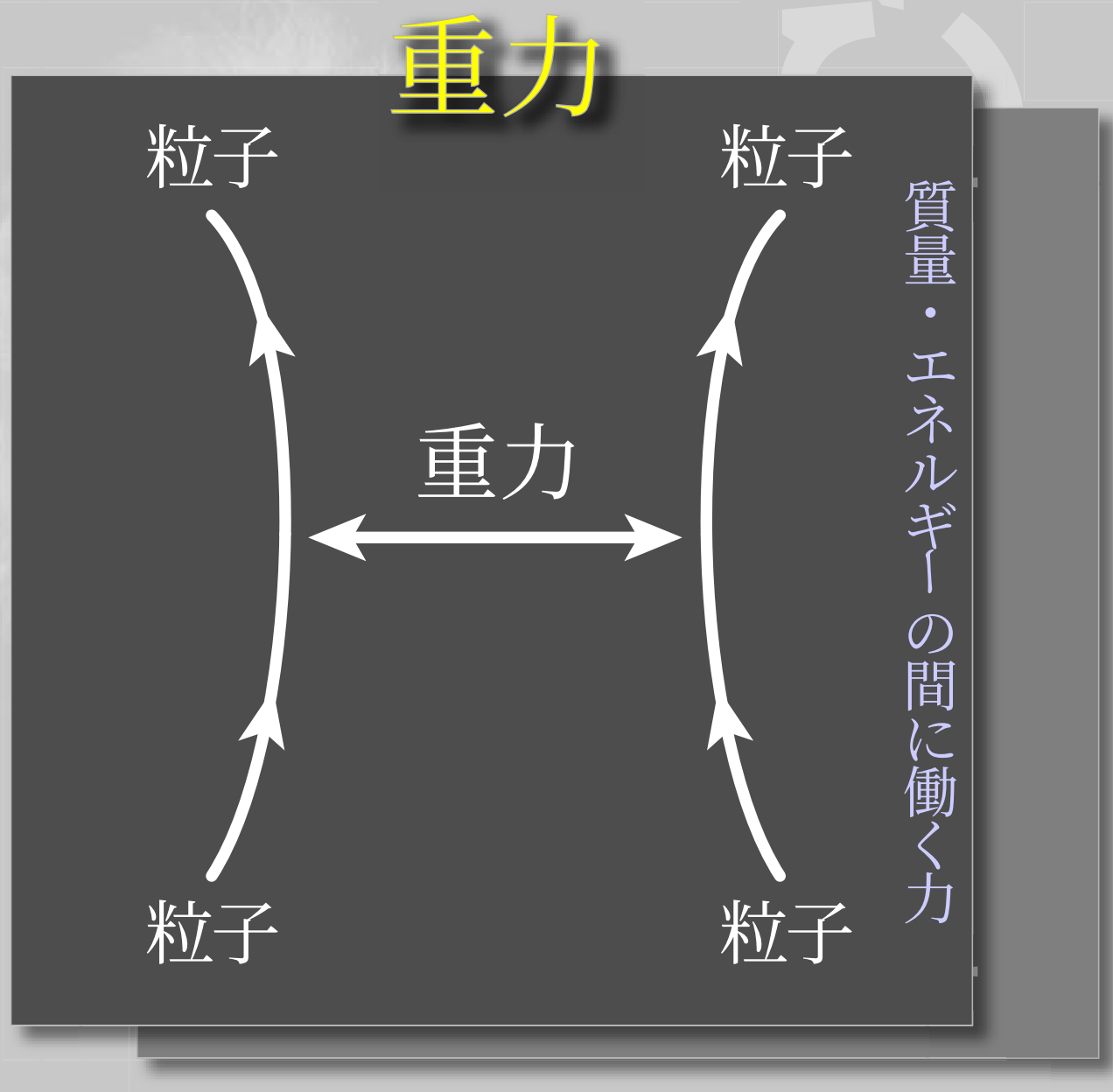


現代物理学における"力"とは？

物質

力

時空

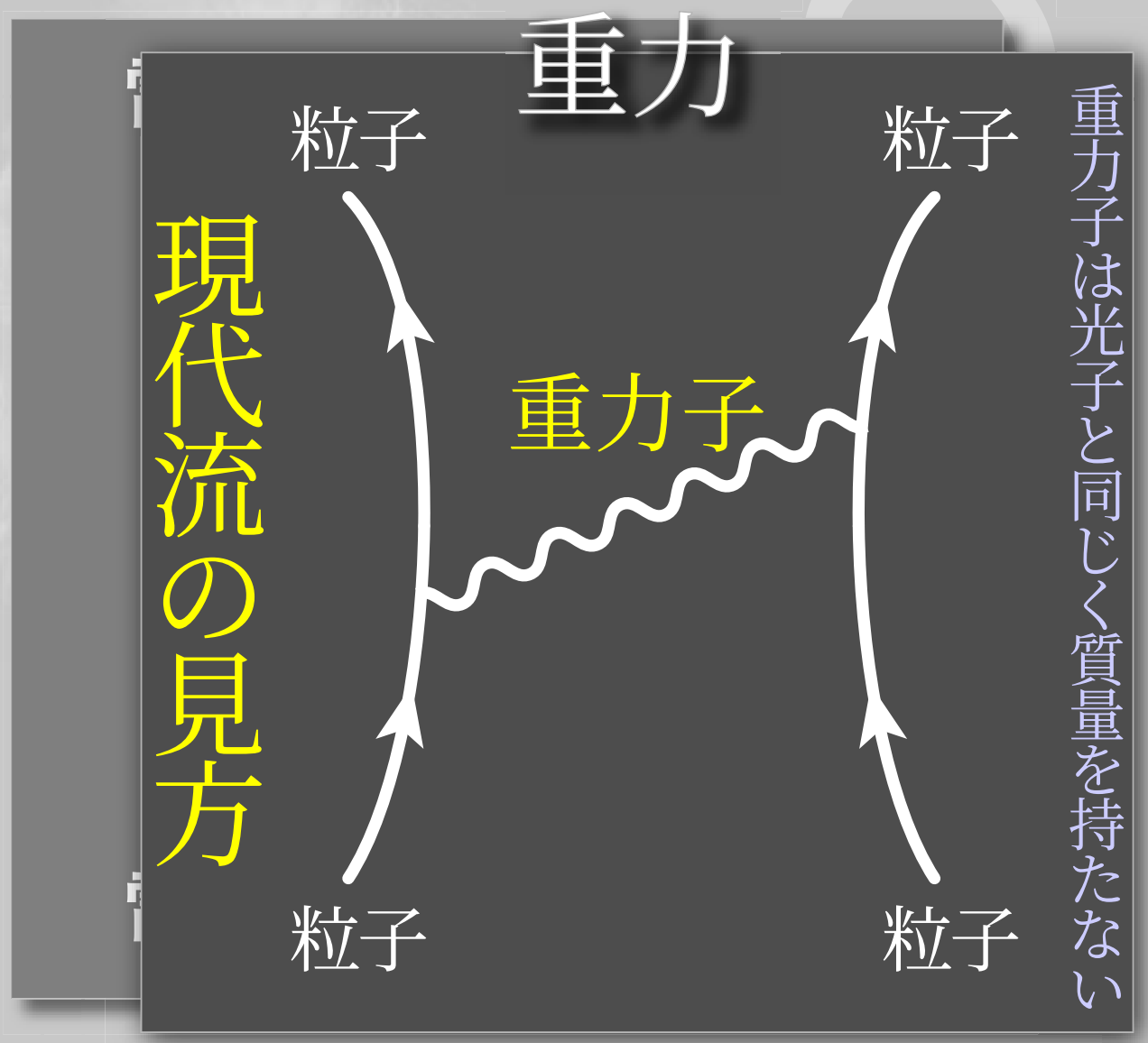


現代物理学における"力"とは？

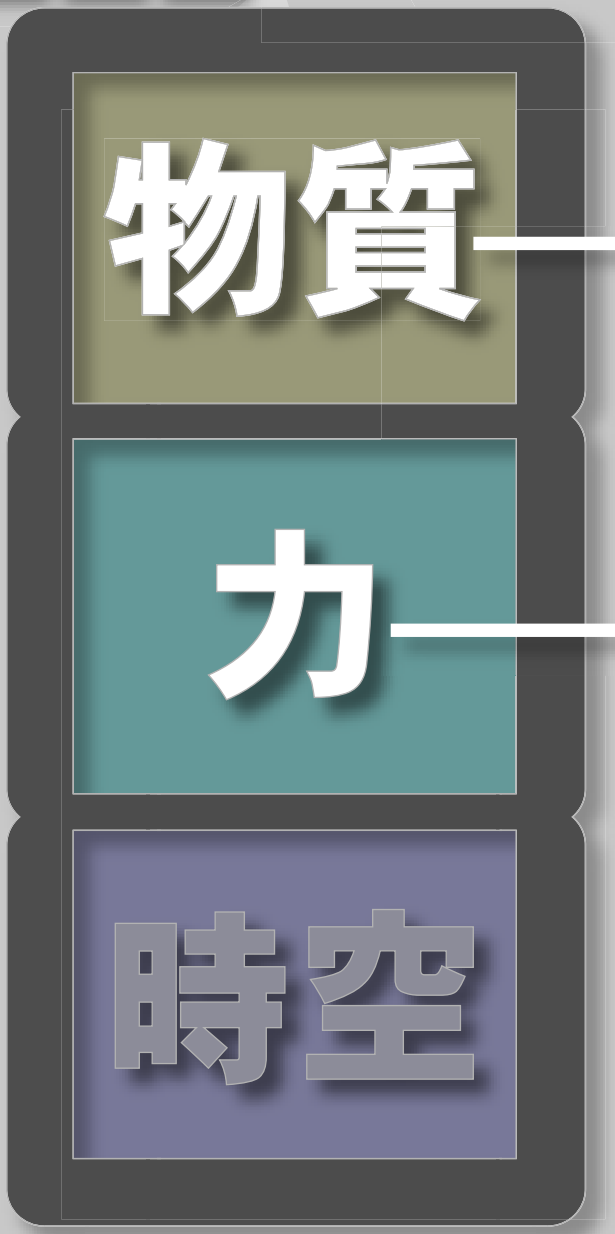
物質

力

時空

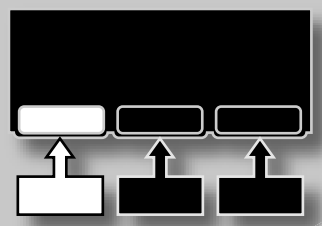


現代物理学における"力"とは？



物質と力の統一

物質も力も根源は同じもの！



現代物理学における"力"とは？

物質

力

時空

物質と力の統一

物質も力も根源は同じもの！

力＝媒介する粒子による相互作用

アインシュタインの時空

物質と時空の統一？

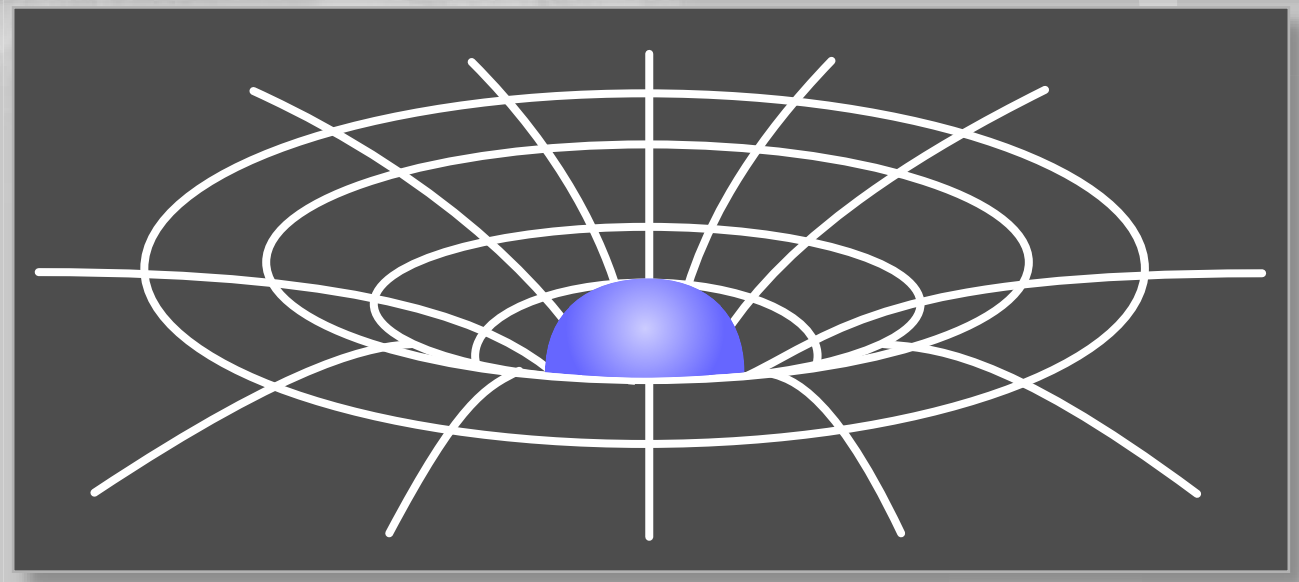
アインシュタインの時空

物質

力

時空

『質量はどう曲がるべきか
を空間に教え、



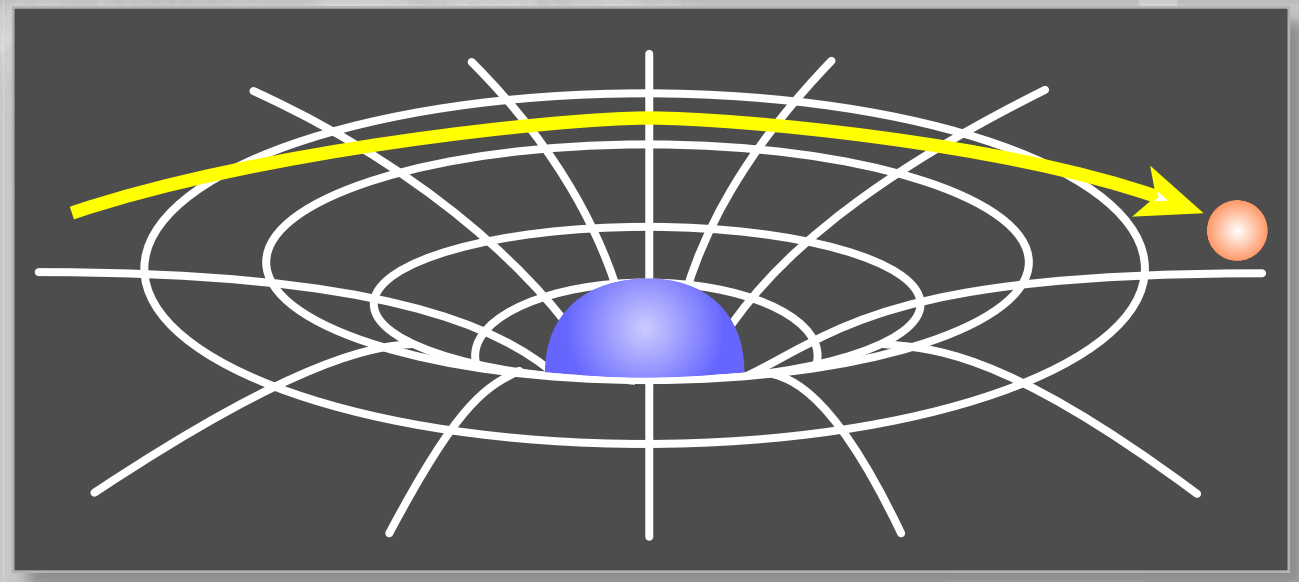
アインシュタインの時空

物質

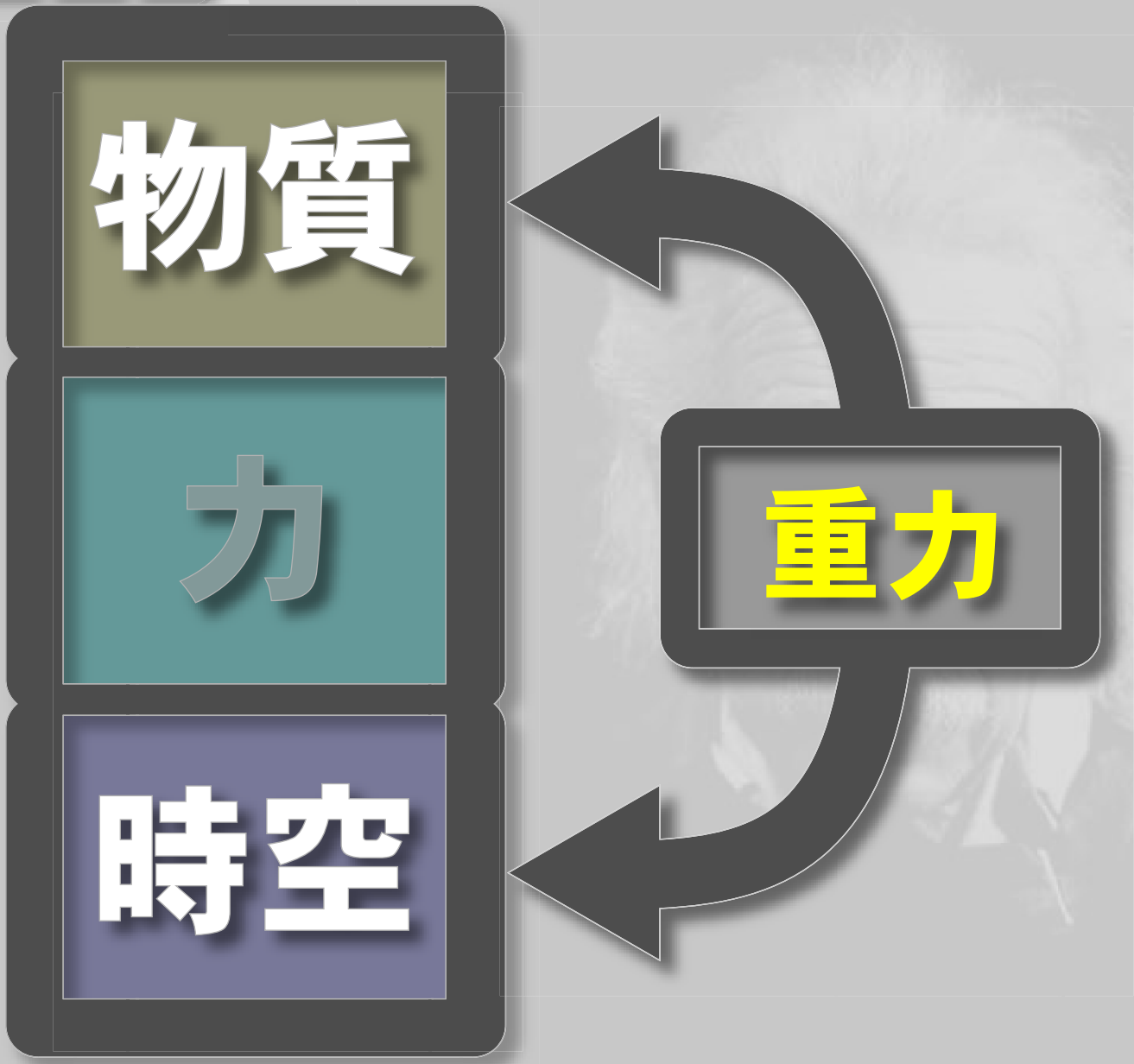
力

時空

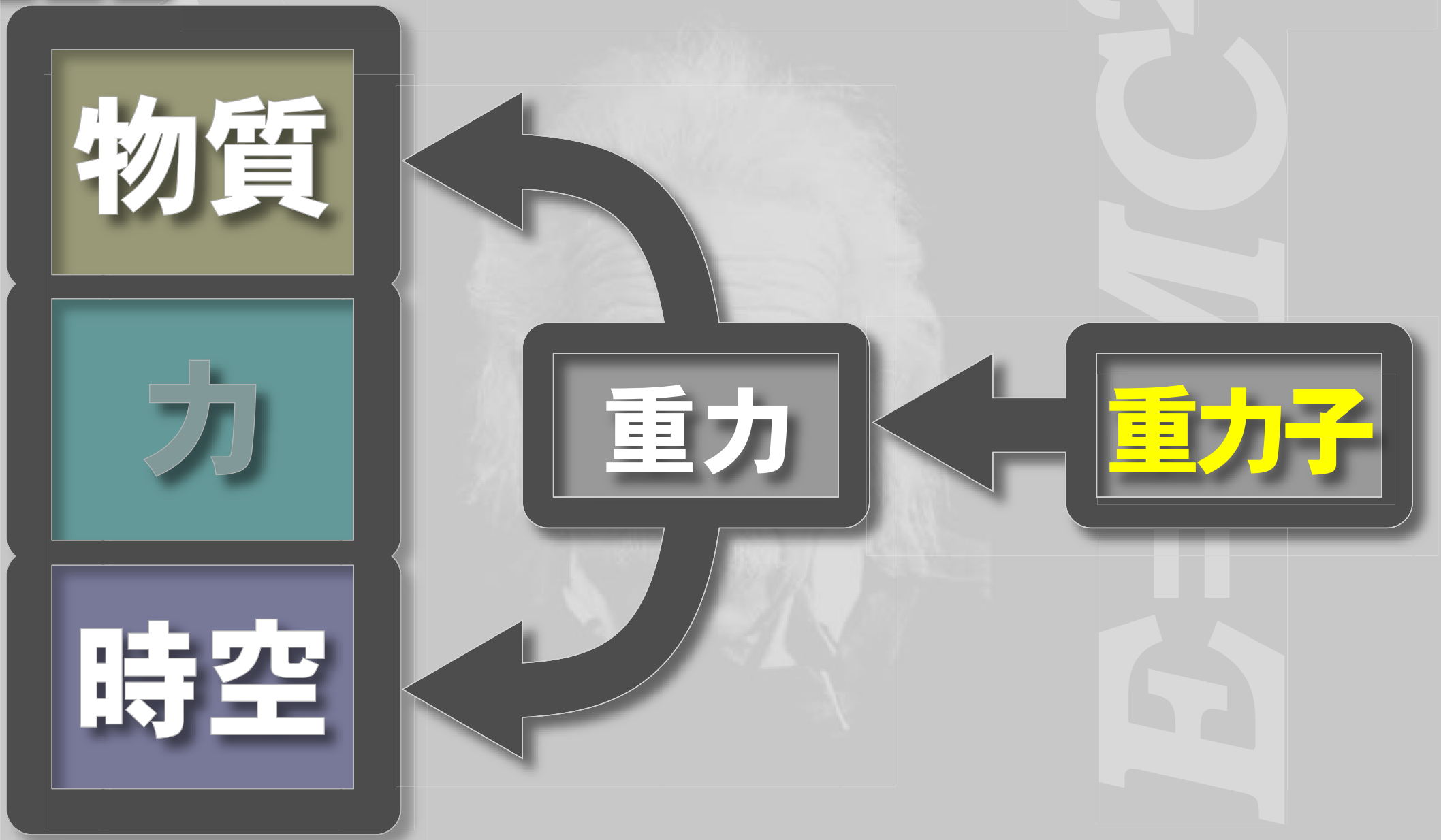
『質量はどう曲がるべきか
を空間に教え、
空間はどう動くべきか
を質量に教える。』



アインシュタインの時空

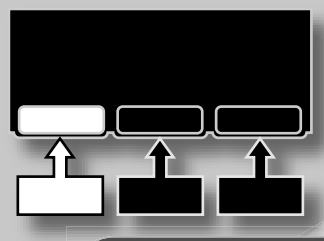


アインシュタインの時空



万物の統一

万物の統一？



万物の統一

物質

力

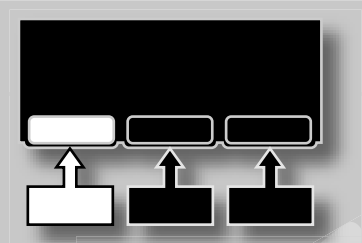
時空

電子
クォーク
ニュートリノ

光子
W, Z 粒子
グルーオン

重力子

万物の統一



物質

力

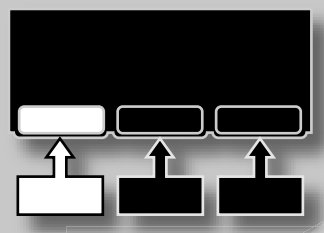
時空

万物の統一

電子
クォーク
ニュートリノ

光子
W, Z 粒子
グルーオン

重力子



万物の統一

物質

力

時空

万物の統一

素粒子の統一

電子
クォーク
ニュートリノ

光子
W, Z 粒子
グルーオン

重力子

究極理論

究極理論

素粒子の統一

超対称性

最小の長さ

統一

対称性

時空

宇宙はすべてを知っているか！

素粒子の統一

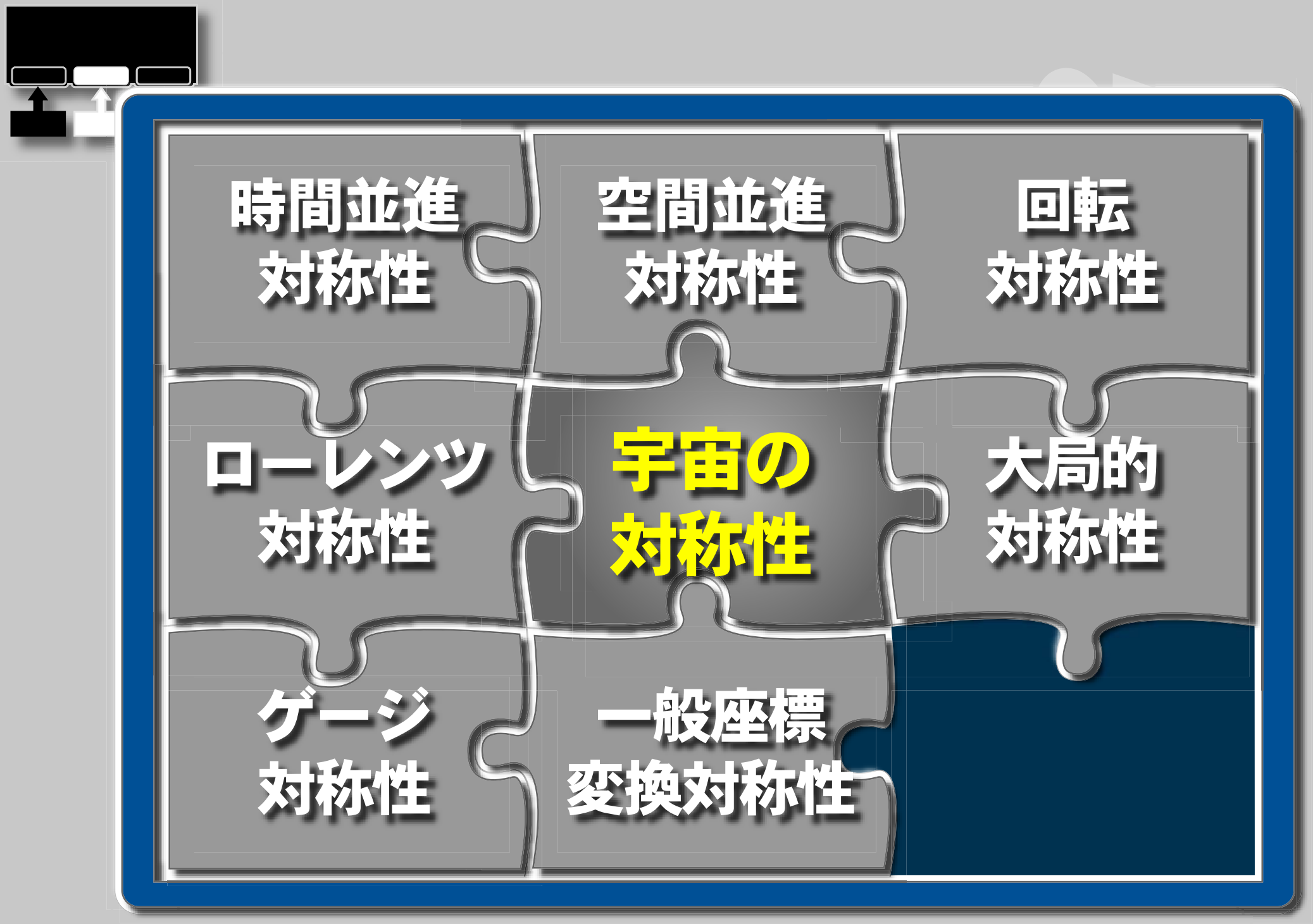
超対称性

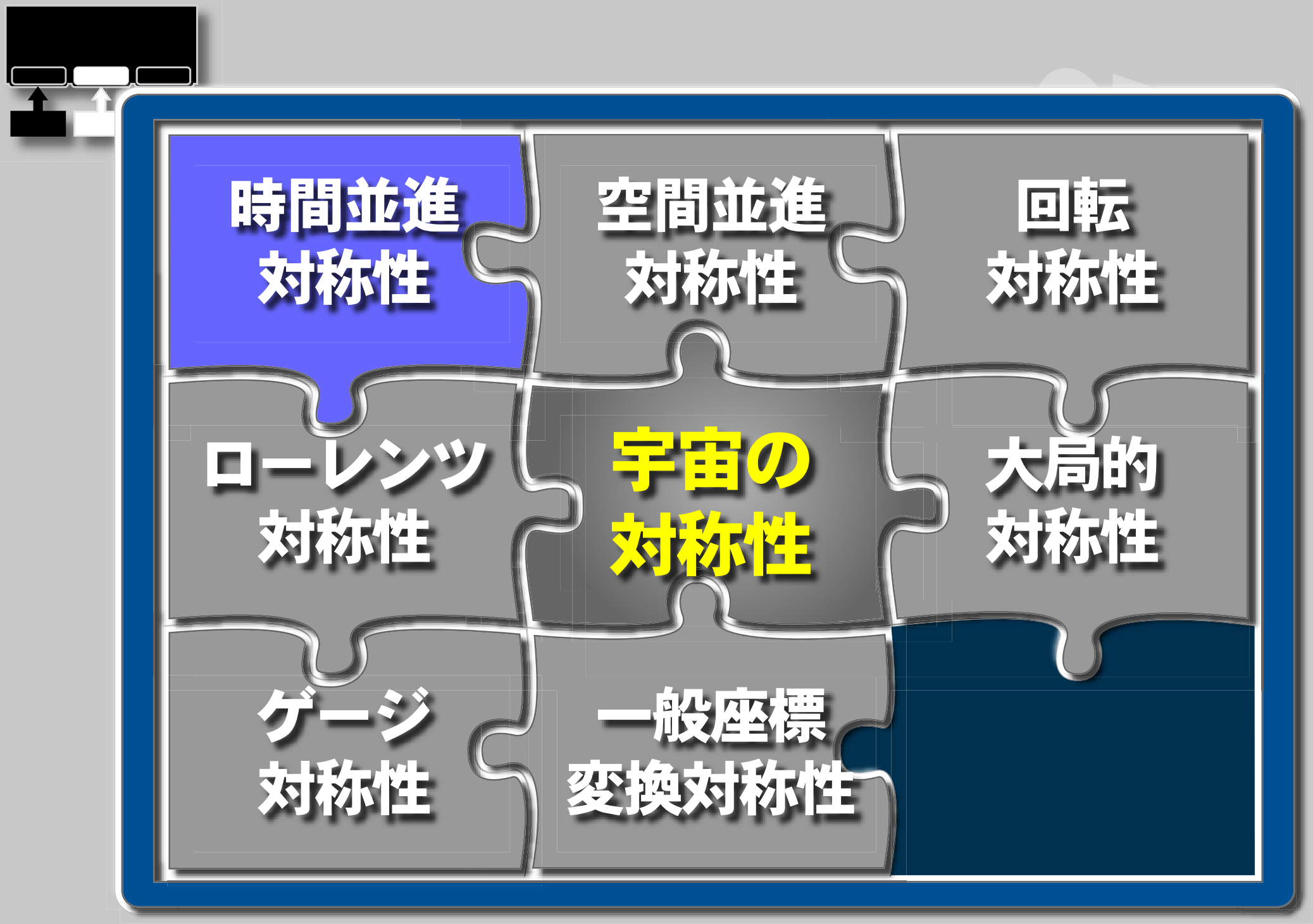
最小の長さ

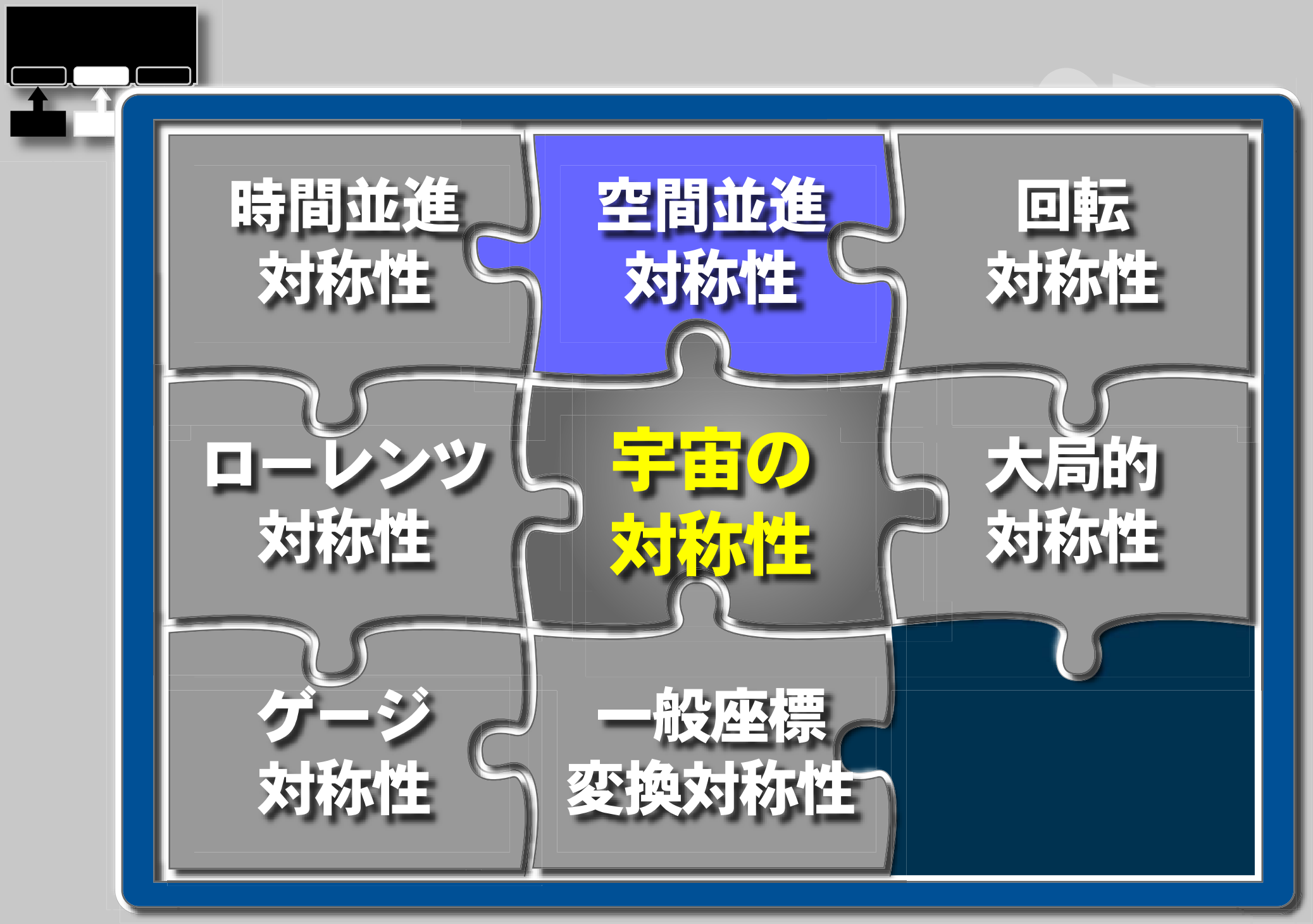
統一

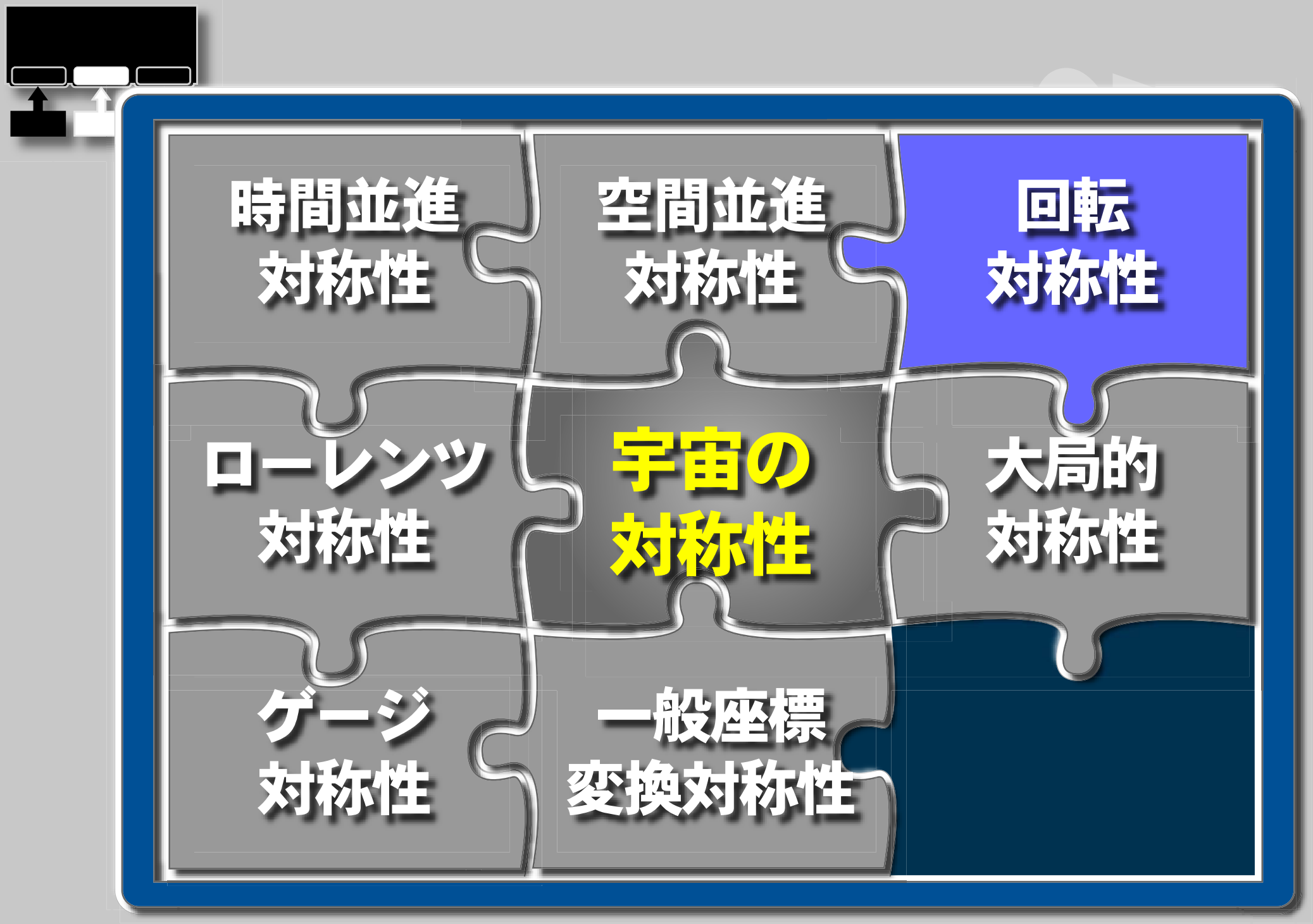
対称性

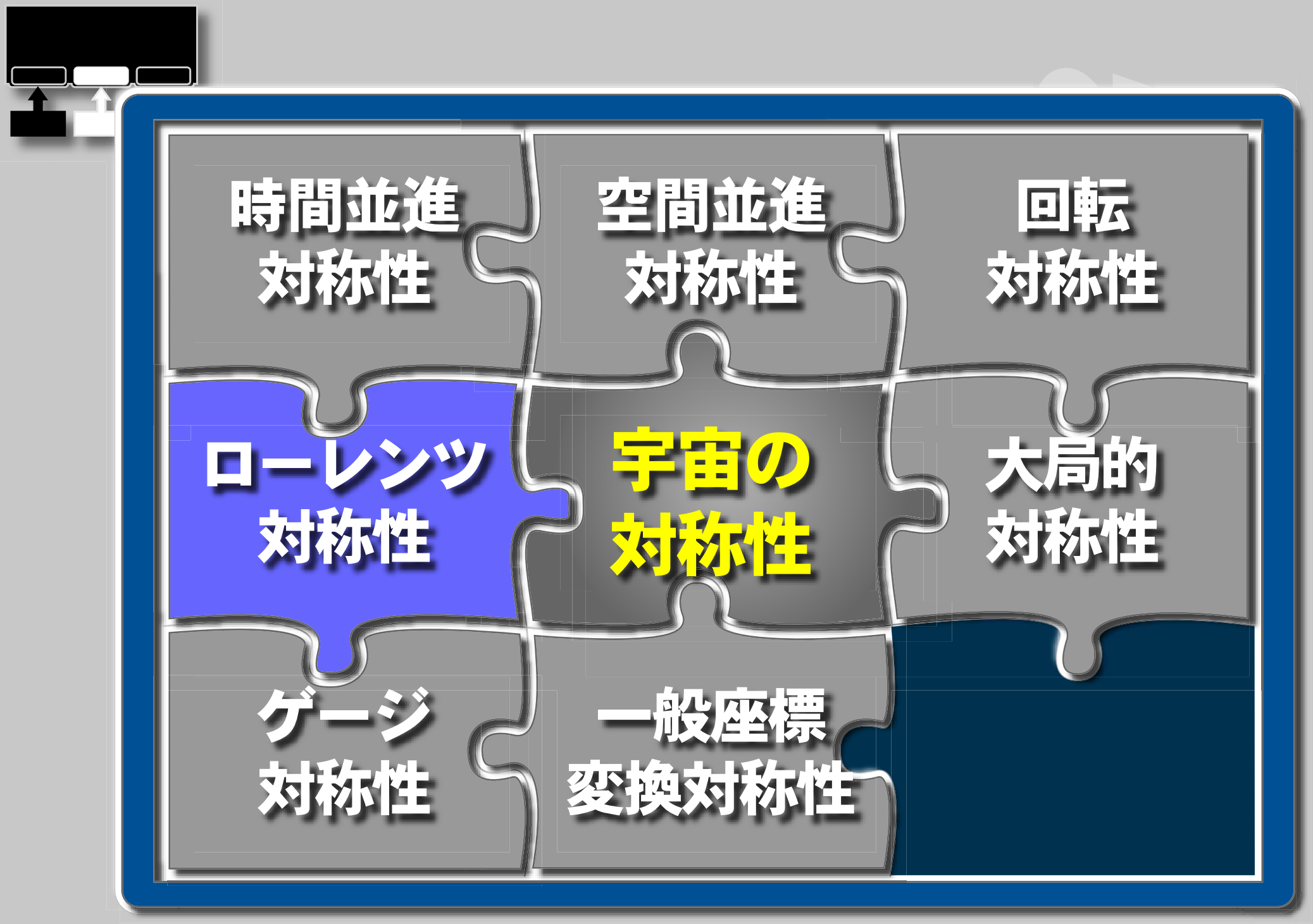
時空

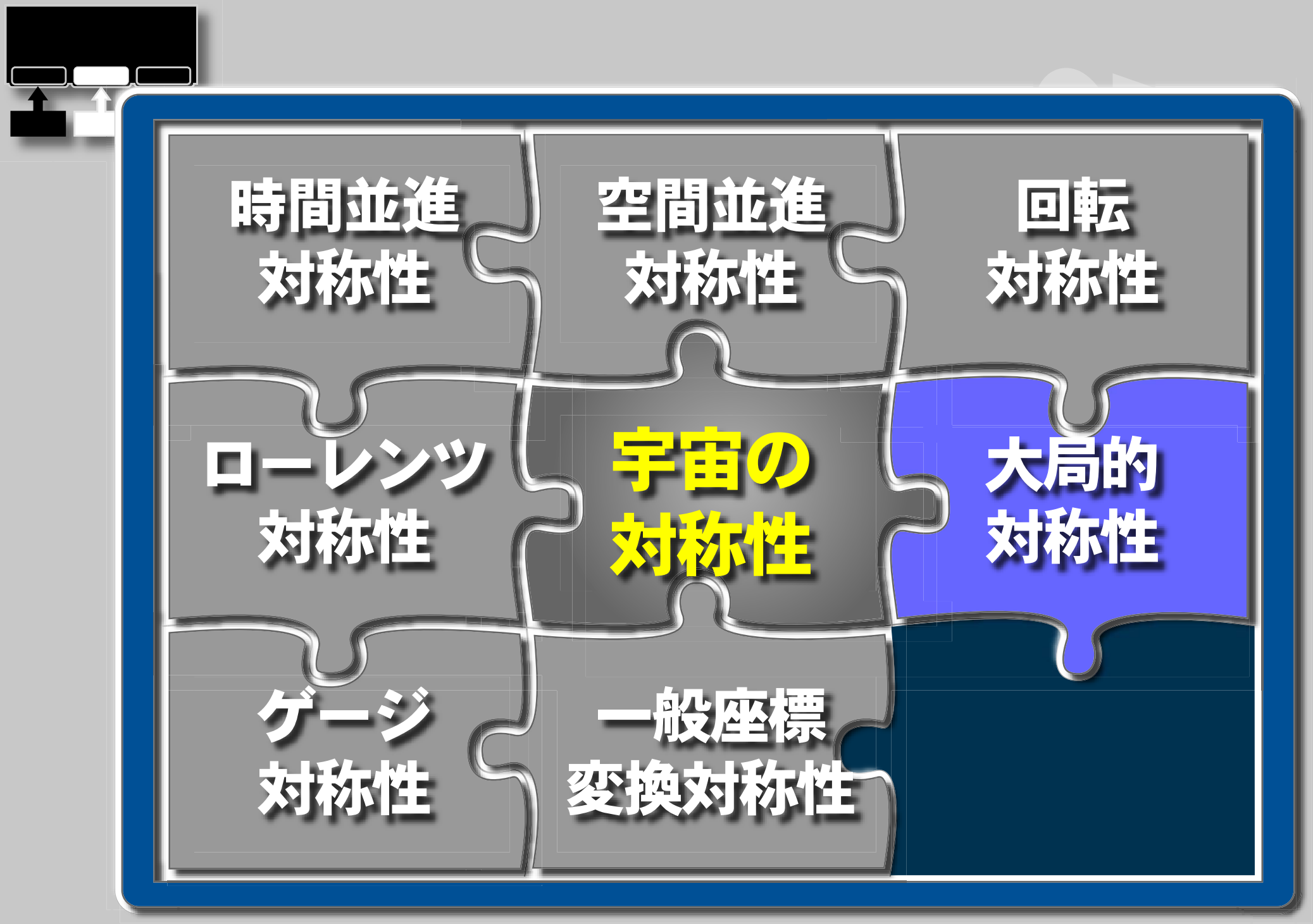

時間並進
対称性
空間並進
対称性
回転
対称性
ローレンツ
対称性
宇宙の
対称性
大局的
対称性
ゲージ
対称性
一般座標
変換対称性

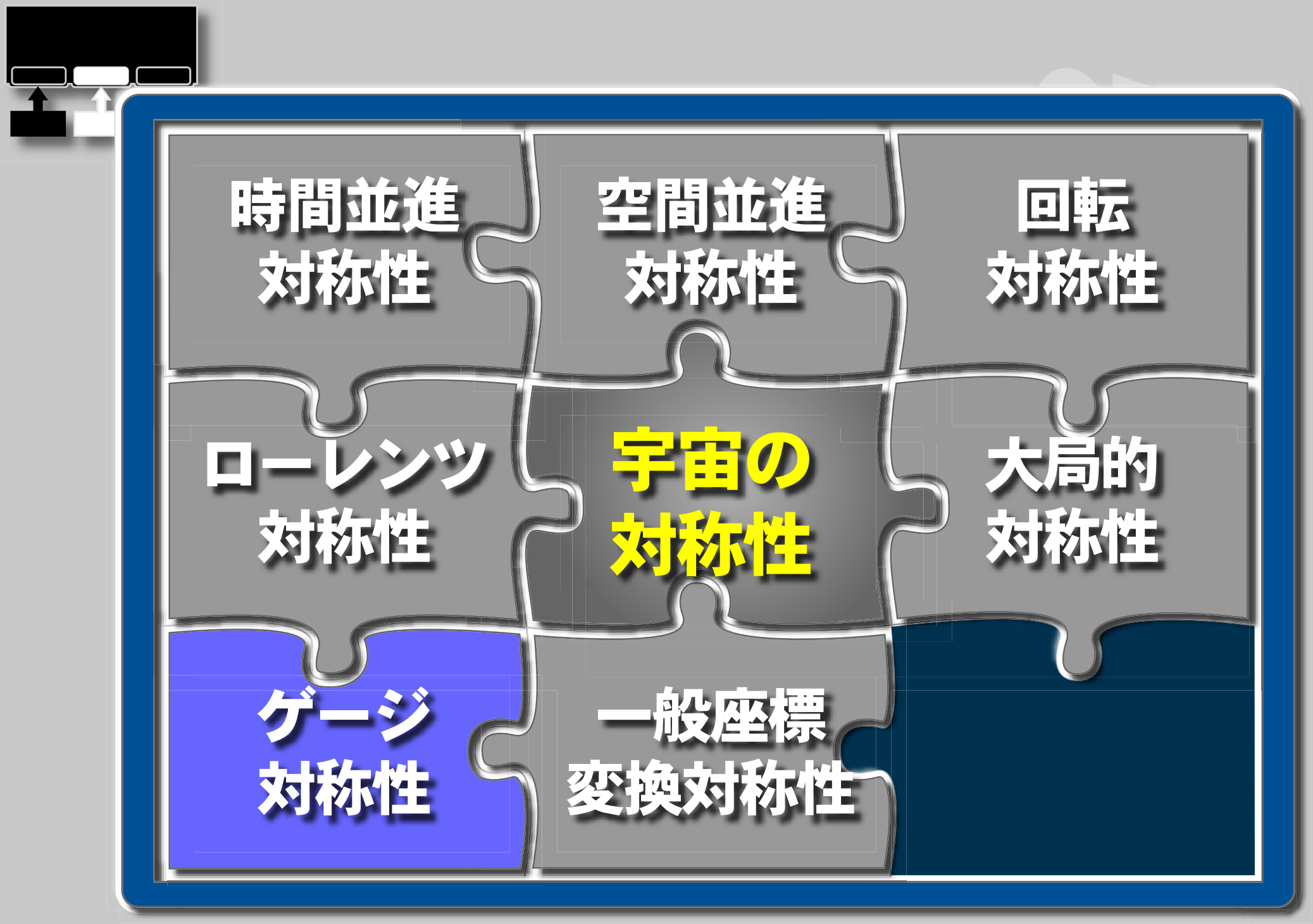

時間並進
対称性
空間並進
対称性
回転
対称性
ローレンツ
対称性
宇宙の
対称性
大局的
対称性
ゲージ
対称性
一般座標
変換対称性

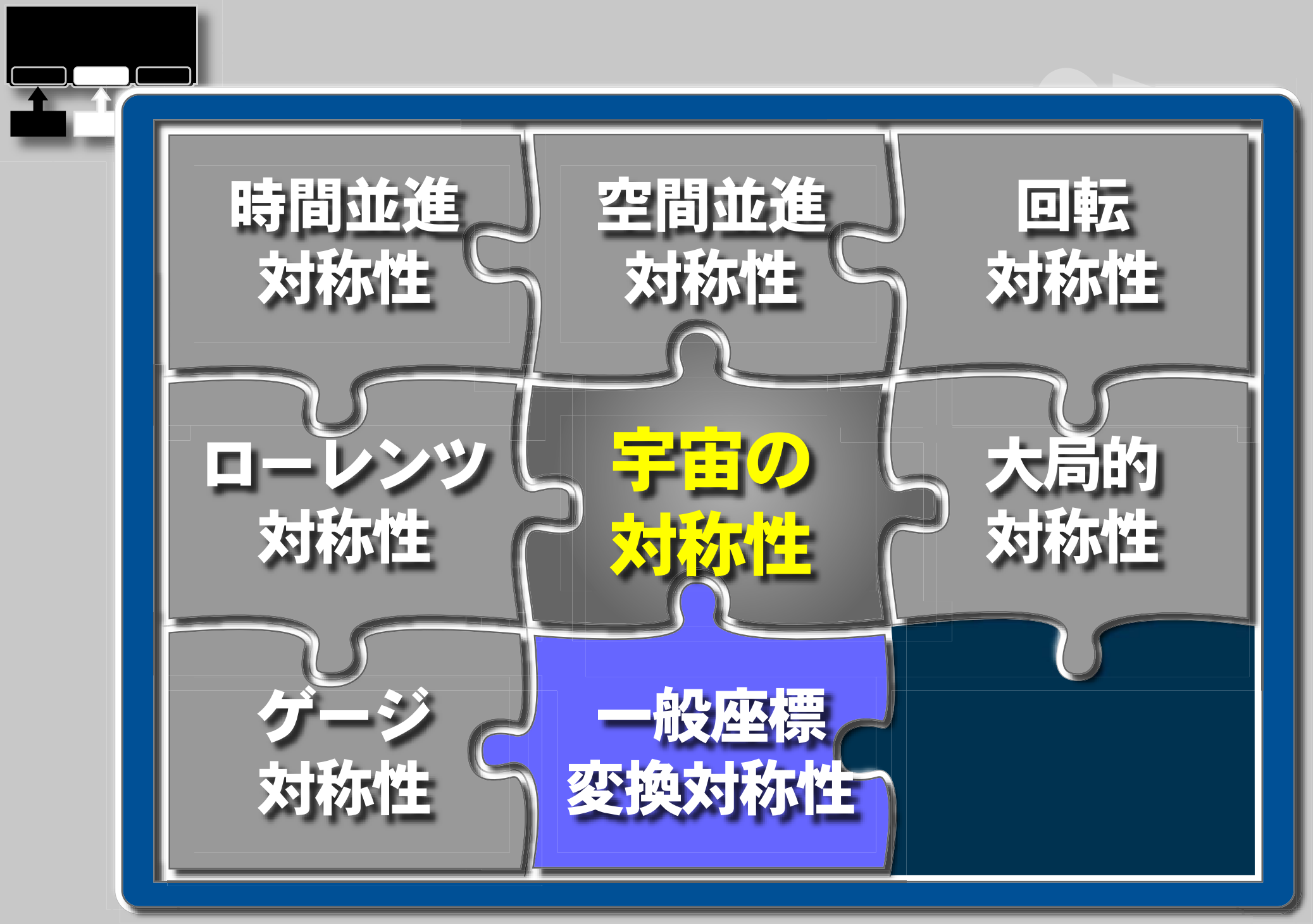

時間並進
対称性
空間並進
対称性
回転
対称性
ローレンツ
対称性
宇宙の
対称性
大局的
対称性
ゲージ
対称性
一般座標
変換対称性

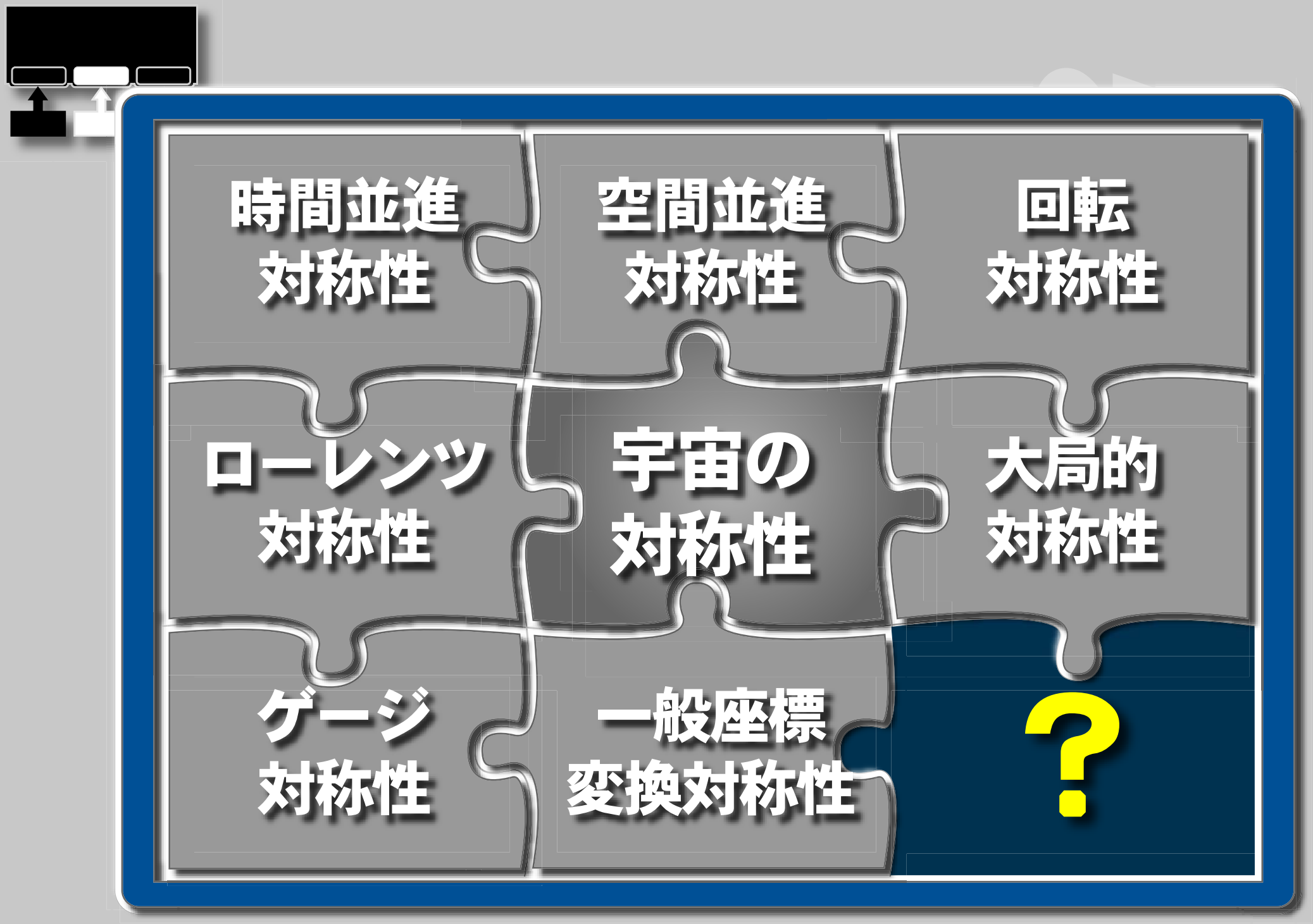

時間並進
対称性
空間並進
対称性
回転
対称性
ローレンツ
対称性
宇宙の
対称性
大局的
対称性
ゲージ
対称性
一般座標
変換対称性

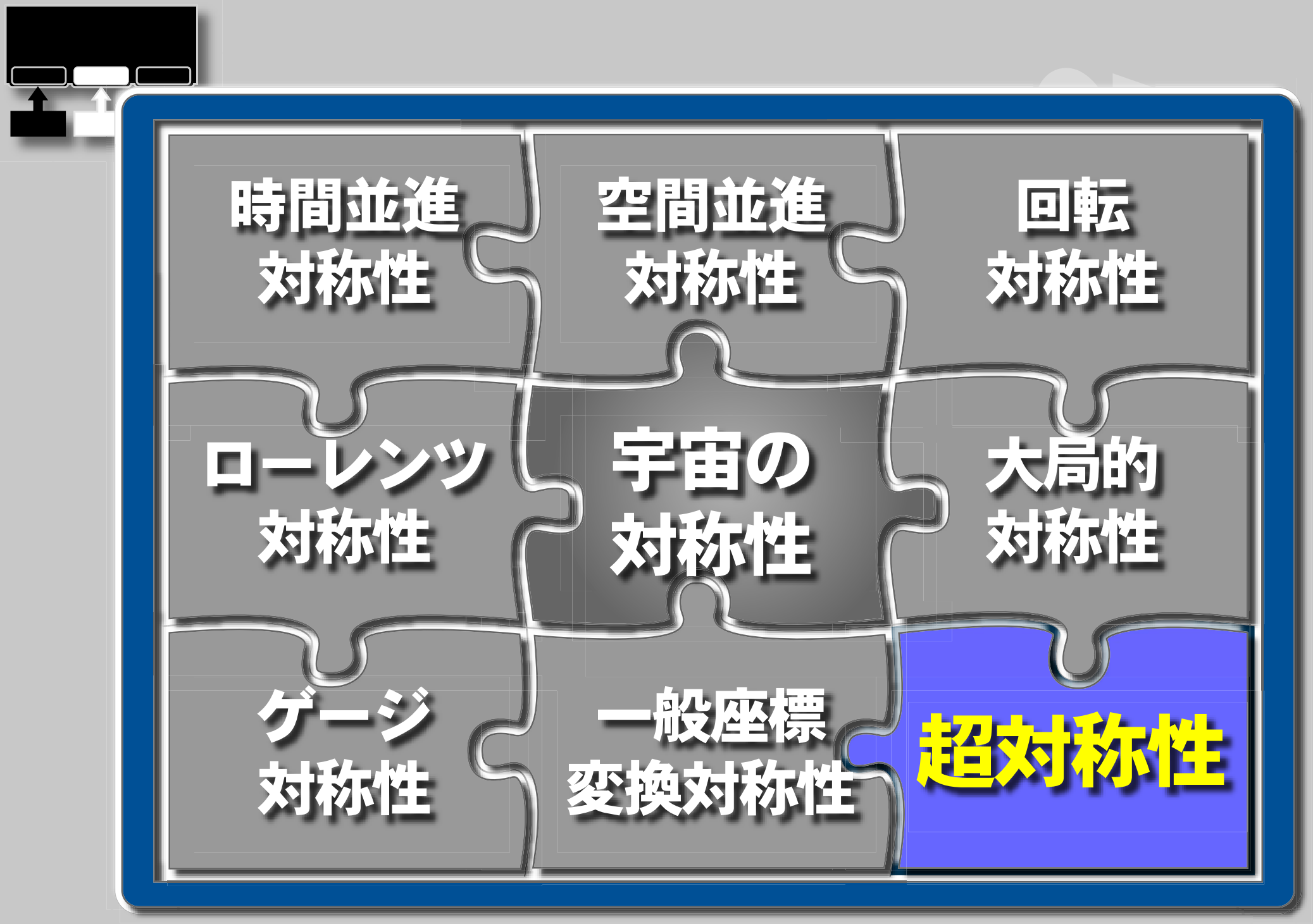

時間並進
対称性
空間並進
対称性
回転
対称性
ローレンツ
対称性
宇宙の
対称性
大局的
対称性
ゲージ
対称性
一般座標
変換対称性

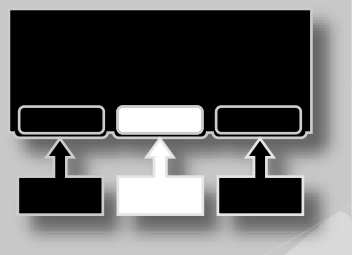

時間並進
対称性
空間並進
対称性
回転
対称性
ローレンツ
対称性
宇宙の
対称性
大局的
対称性
ゲージ
対称性
一般座標
変換対称性


時間並進
対称性
空間並進
対称性
回転
対称性
ローレンツ
対称性
宇宙の
対称性
大局的
対称性
ゲージ
対称性
一般座標
変換対称性


時間並進
対称性
空間並進
対称性
回転
対称性
ローレンツ
対称性
宇宙の
対称性
大局的
対称性
ゲージ
対称性
一般座標
変換対称性

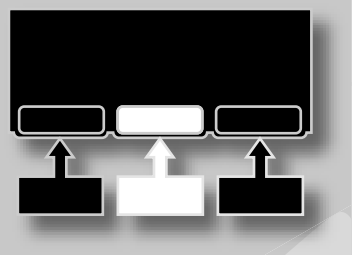

時間並進
対称性
空間並進
対称性
回転
対称性
ローレンツ
対称性
宇宙の
対称性
大局的
対称性
ゲージ
対称性
一般座標
変換対称性
?


時間並進
対称性
空間並進
対称性
回転
対称性
ローレンツ
対称性
宇宙の
対称性
大局的
対称性
ゲージ
対称性
一般座標
変換対称性
超対称性



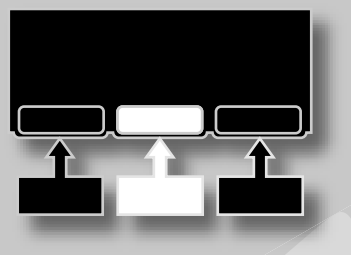
物質	電子、クォーク ニュートリノ	
力	光子、W,Z粒子 グルーオン	
時空	グラビティーノ	
	重力子	

素粒子のリスト



回転の大きさ

素粒子のリスト	スピン
物質 電子、クォーク ニュートリノ	$\frac{1}{2}$
力 光子、W,Z粒子 グルーオン	1
時空 グラビティーノ	$\frac{3}{2}$
重力子	2



回転の大きさ

素粒子のリスト	スピン
電子、クォーク ニュートリノ	$\frac{1}{2}$
光子、W,Z粒子 グルーオン	1
グラビティーノ	$\frac{3}{2}$
重力子	2

物質

力

時空

超対称性

究極理論

素粒子の統一

超対称性

最小の長さ

統一

対称性

時空

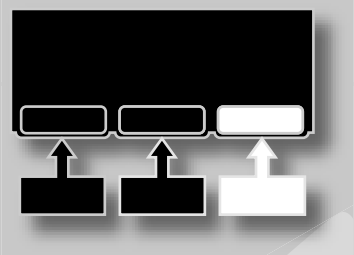
坂本眞人　サイエンスセミナー 2008年7月27日、 ー究極理論への夢ー

究極理論

我々の常識は
宇宙の非常識！

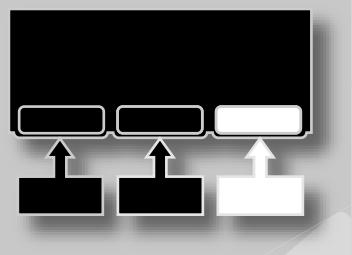
素粒子の統一　　超対称性　　最小の長さ

統一　　対称性　　時空



我々の常識(その1)

速さに限界はない!



我々の常識(その1)

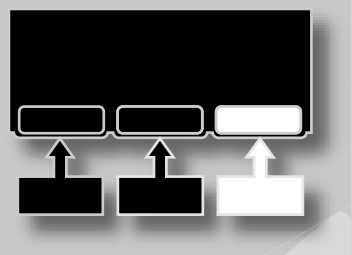
速さに限界はない!

相対論

c

光速

$E=mc^2$



我々の常識（その1）

速さに限界はない！

相対論

c

宇宙の常識（その1）

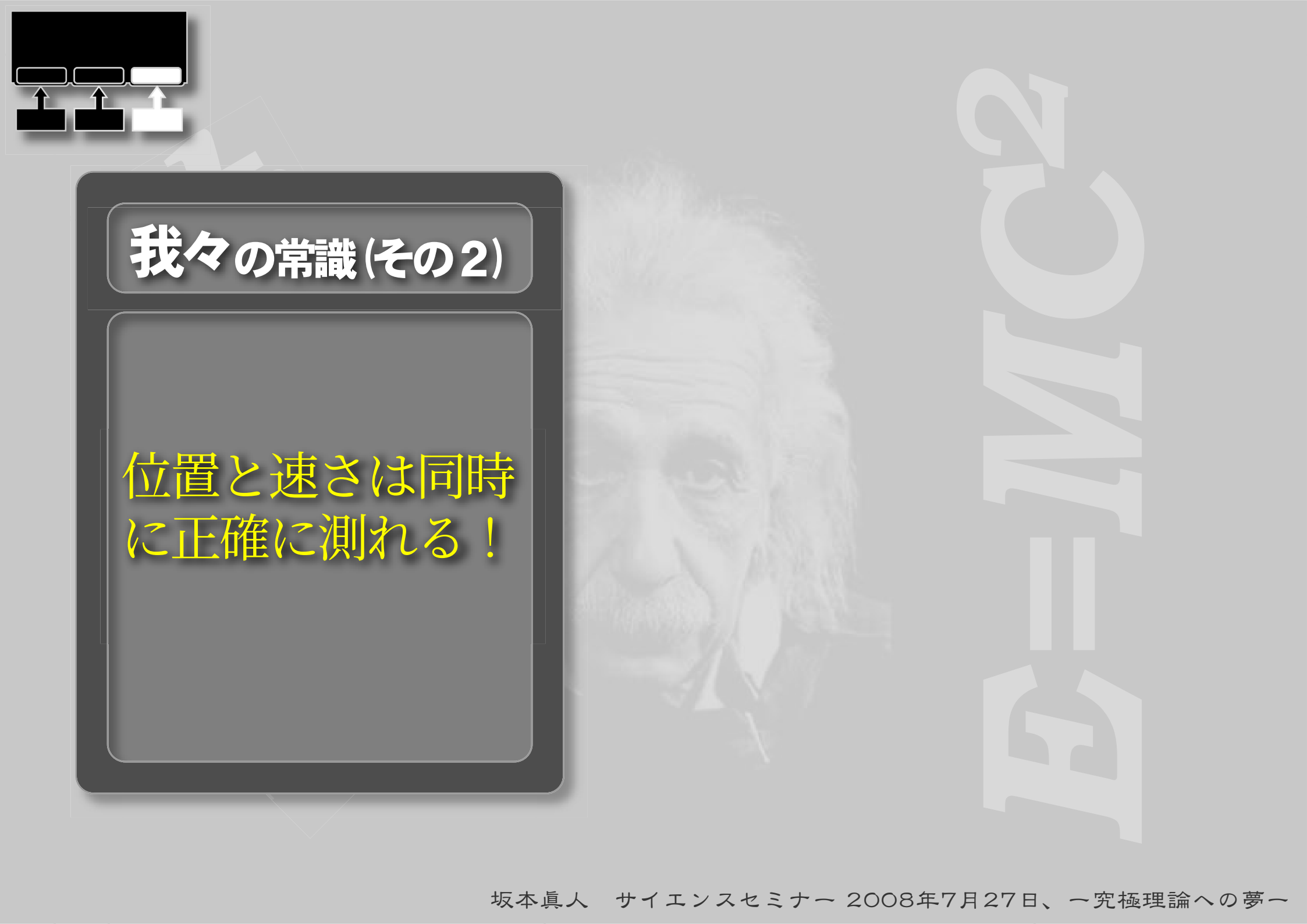
速さの上限

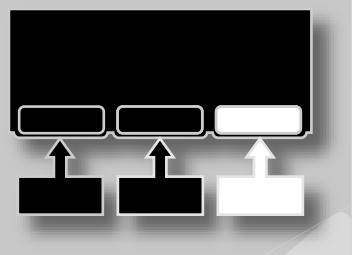
$$v \leq c$$

v：速さ　c：光速

我々の常識(その2)

位置と速さは同時に正確に測れる！





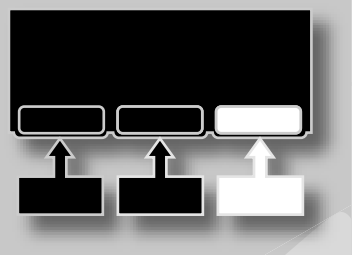
我々の常識(その2)

位置と速さは同時に正確に測れる！

量子論

h

プランク定数/2π



我々の常識(その2)

位置と速さは同時に正確に測れる！

量子論

$\hbar$

宇宙の常識(その2)

不確定性関係

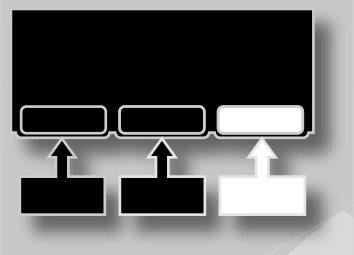
$$\Delta x \, \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

プランク定数/2π

位置の不確定さ

運動量の不確定さ

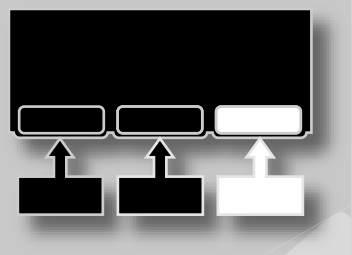
$p = mv$



我々の常識(その3)

空間は連続である！

E=MC2



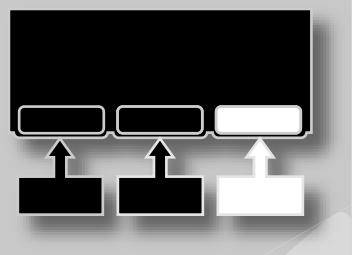
我々の常識(その3)

空間は連続である！

量子重力理論

L_P

プランクの長さ



我々の常識(その3)

空間は連続である！

量子重力理論

L_P

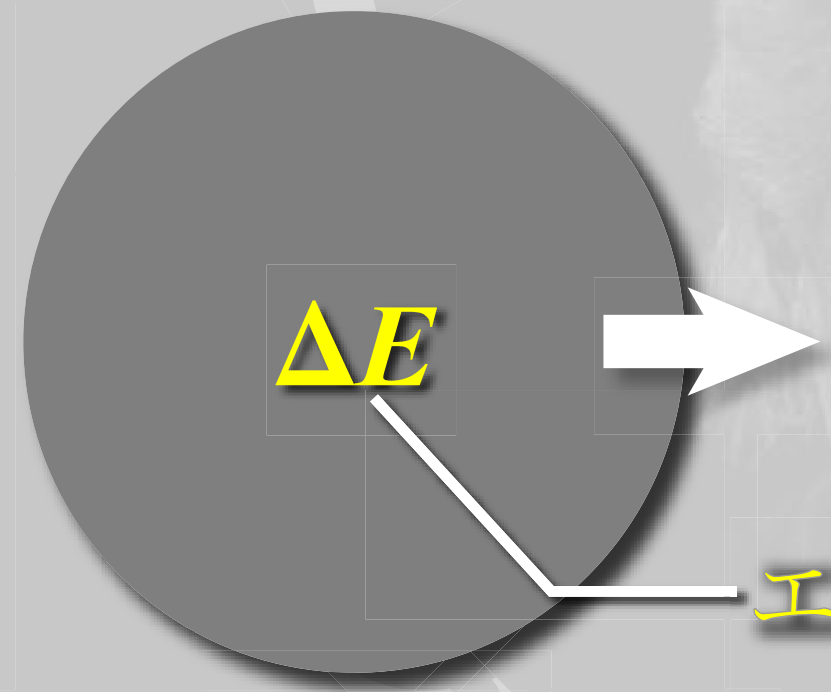
宇宙の常識(その3)

最小の長さ

$$\Delta x \geq L_P$$

プランクの長さ

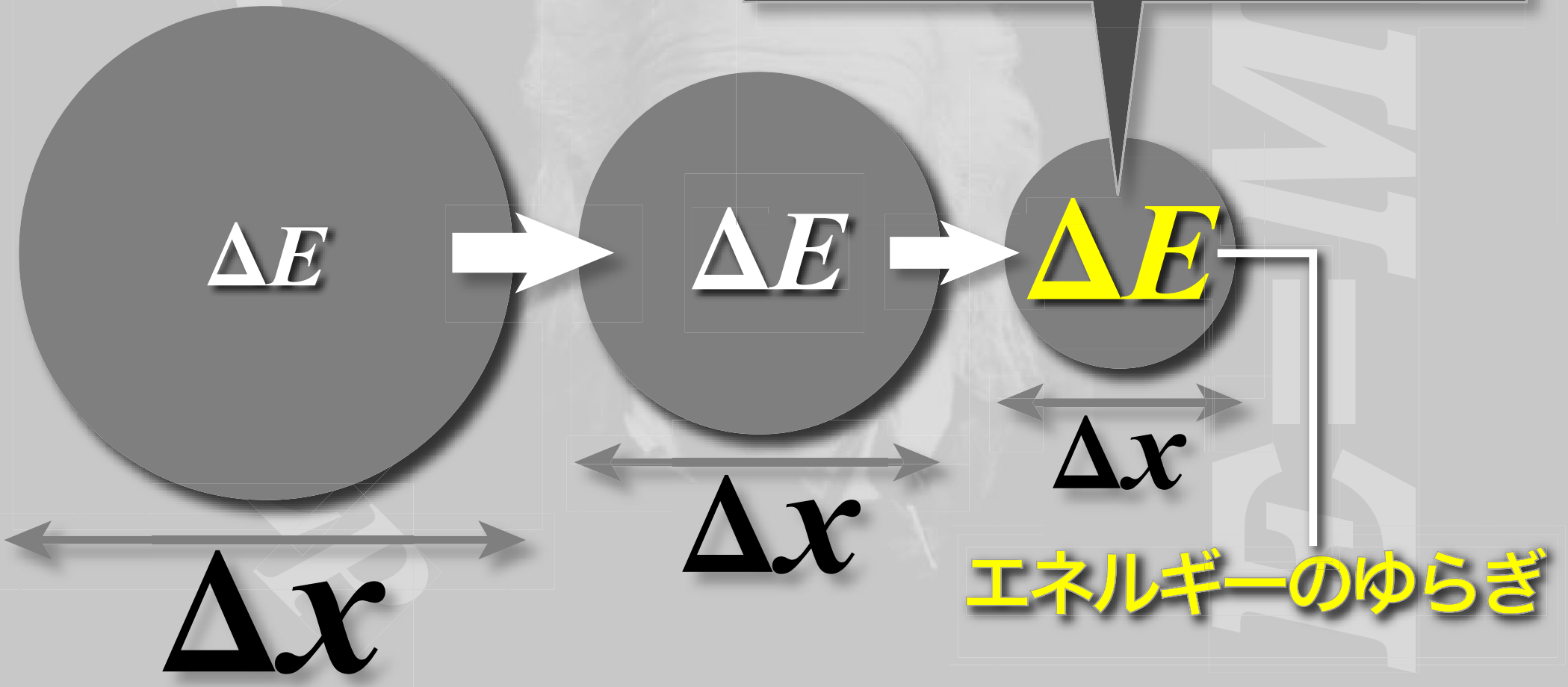
『最小の長さ』の直感的な説明



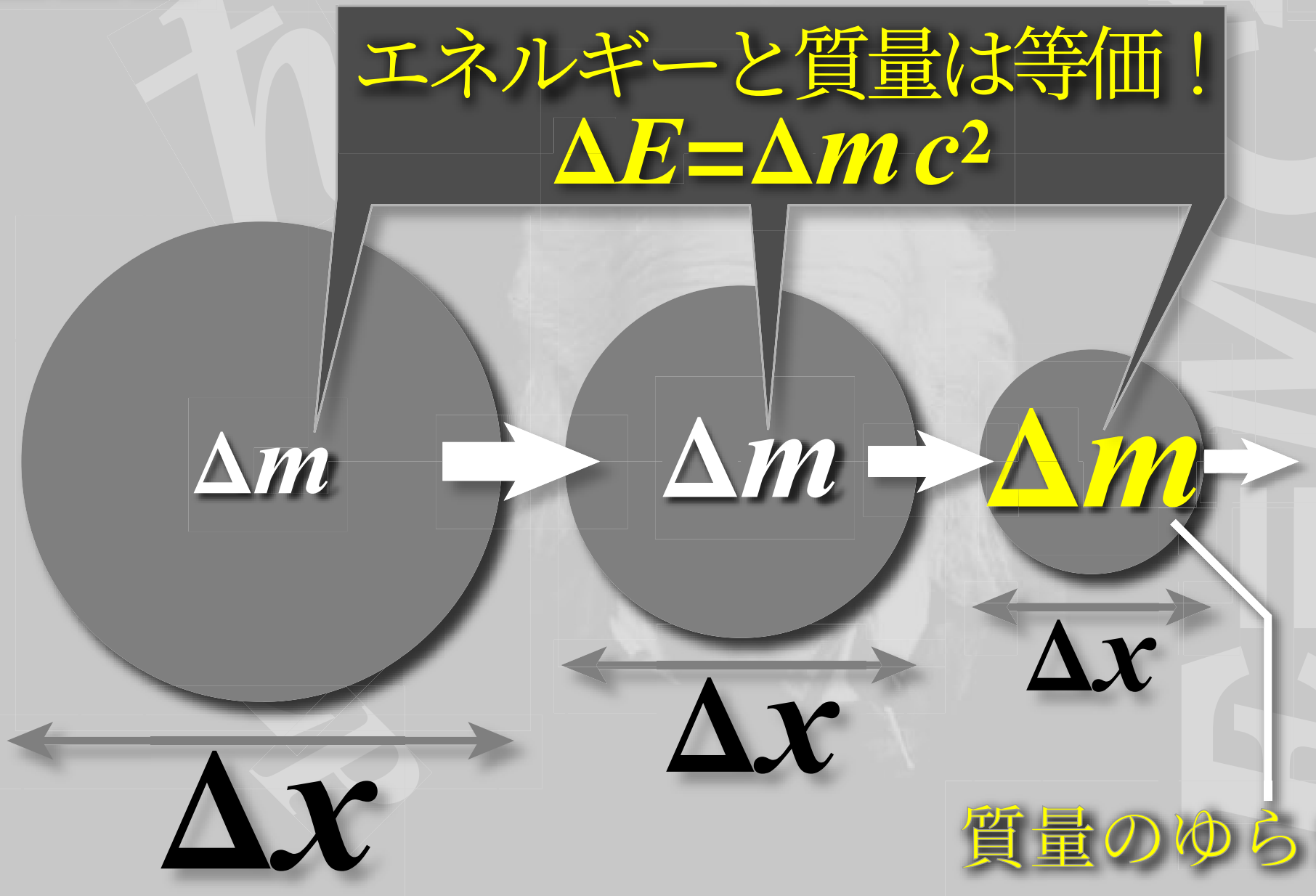
Δx

Δxが小さければ
小さいほど・・・

『最小の長さ』の直感的な説明

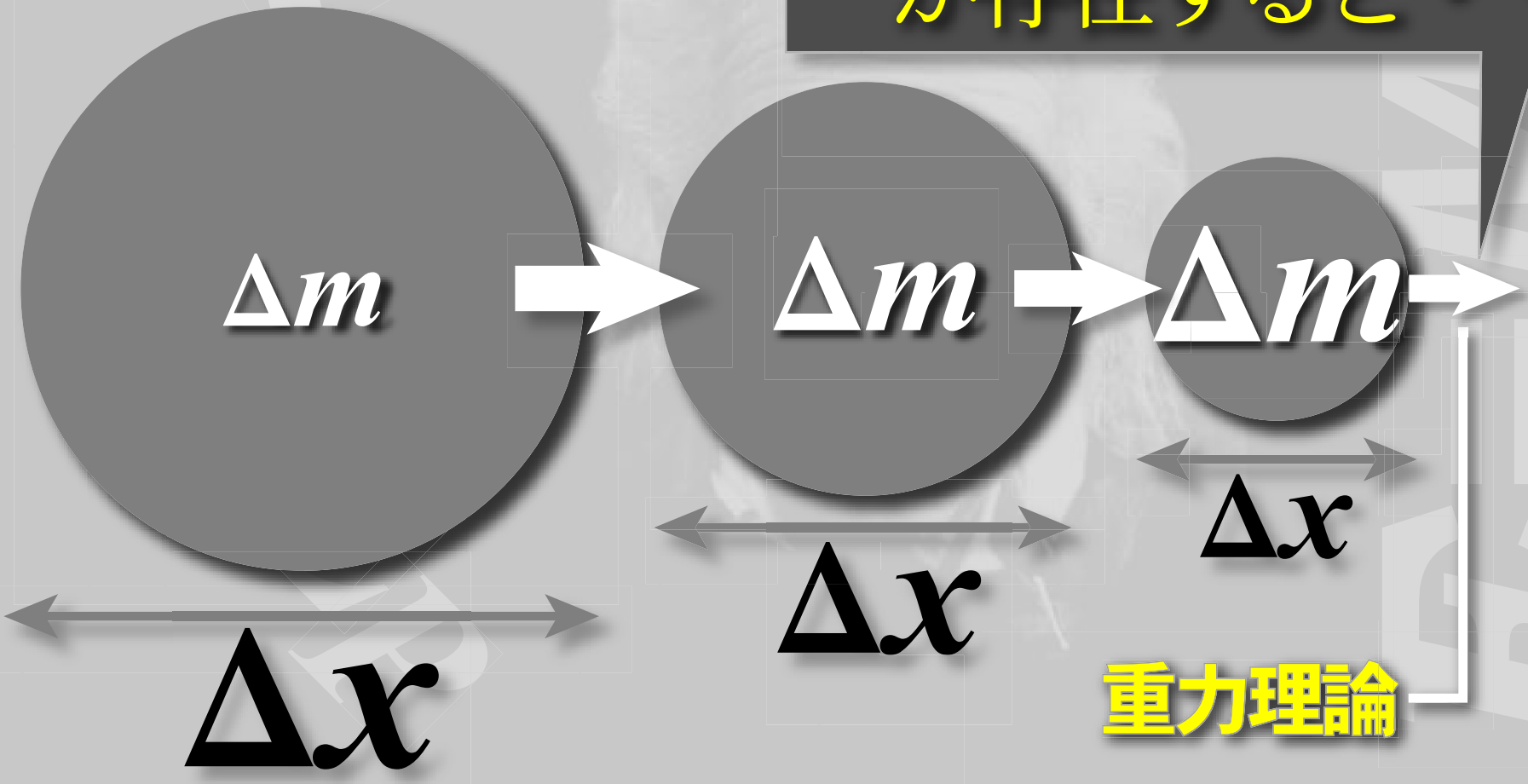


『最小の長さ』の直感的な説明

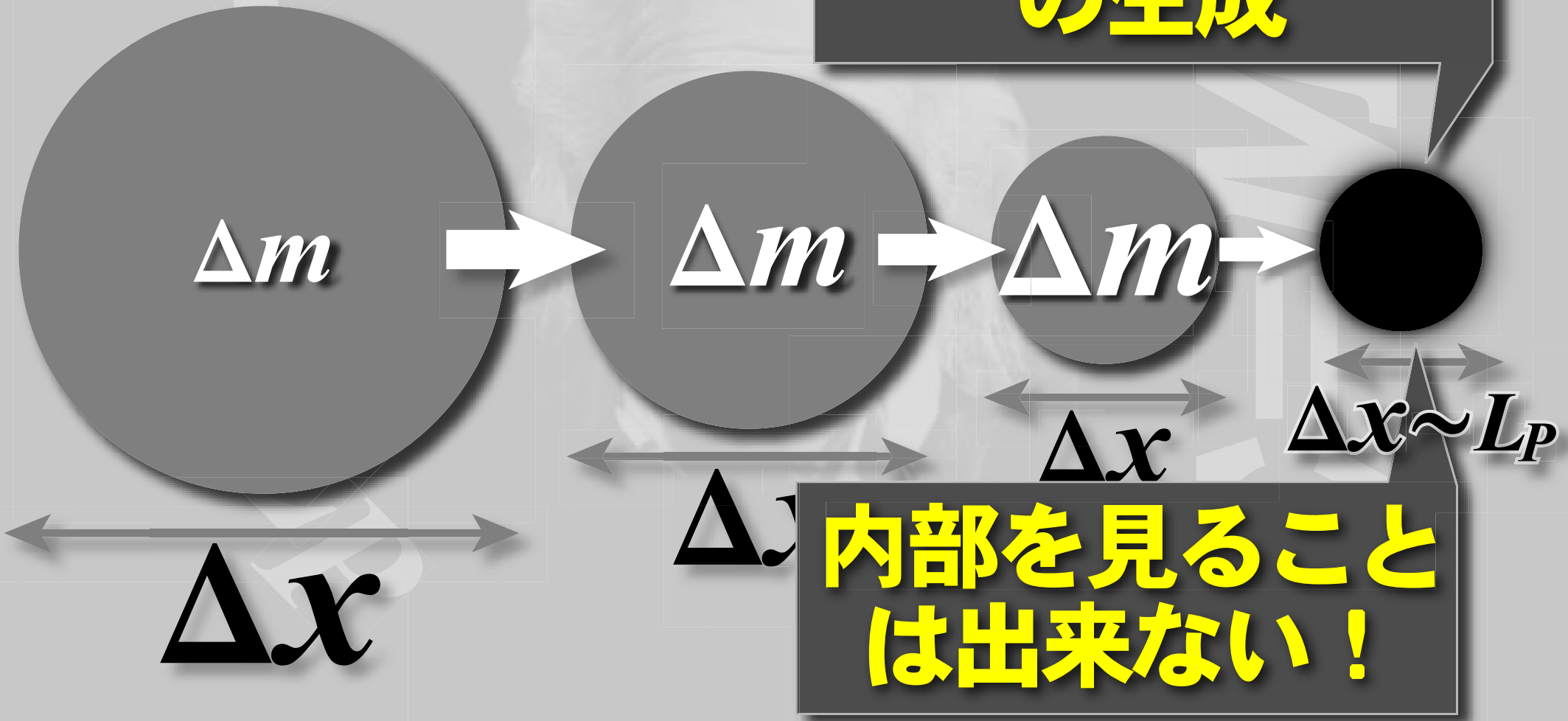


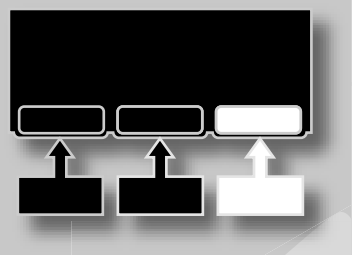
『最小の長さ』の直感的な説明

小さな領域に大きな質量
が存在すると・・・



『最小の長さ』の直感的な説明



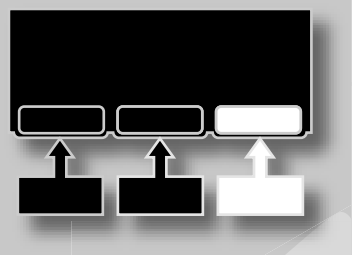


基本的な不等式

$$v \leq c$$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta x \geq L_P$$



基本的な不等式

$$v \leq c$$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

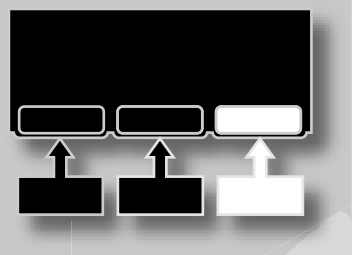
$$\Delta x \geq L_P$$

基本定数

$$c$$

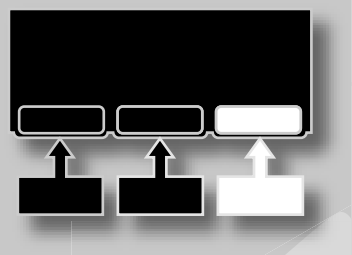
$$\hbar$$

$$L_P$$

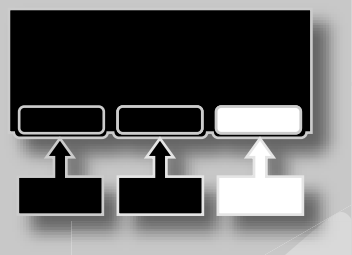


基本的な不等式 基本定数/単位

$v \leq c$	c/速さ	
$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2}$	h/角運動量	
$\Delta x \geq L_P$	L_P/長さ	



基本的な不等式	基本定数/単位	基本理論
$v \leq c$	c/速さ	**相対論**
$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2}$	h/角運動量	**量子論**
$\Delta x \geq L_P$	L_P/長さ	**量子重力理論**



基本的な不等式	基本定数/単位	基本理論
$v \leq c$	c/速さ	相対論
$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2}$	h/角運動量	量子論
$\Delta x \geq L_P$	L_P/長さ	量子重力理論

究極理論

素粒子の統一

超対称性

最小の長さ

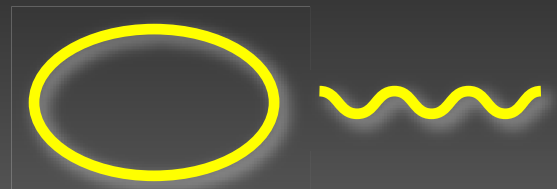
統一

対称性

時空

超弦理論???

「ひも」の理論



素粒子の統一

超対称性

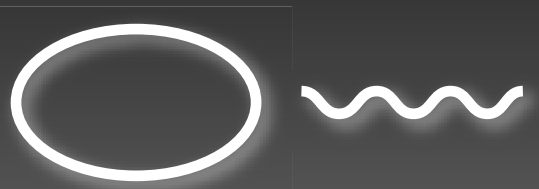
最小の長さ

統一

対称性

時空

超弦理論???

「ひも」の理論 

素粒子の統一

超対称性

最小の長さ

統一

対称性

時空

ひもの大きさは？

ひもの大きさは？

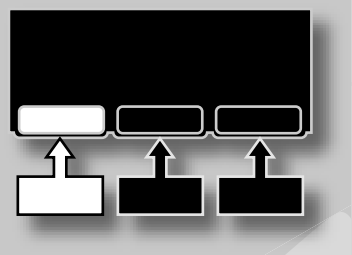
1

100000000000000000000000000000000 cm

33ケ

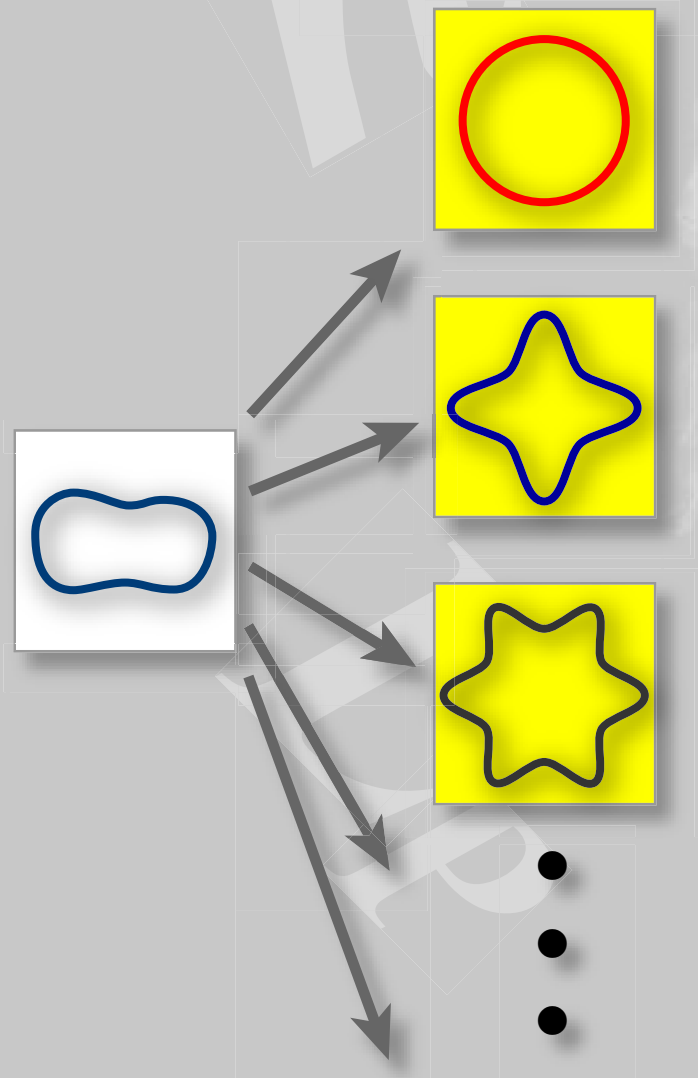
ひもの大きさは？

我々の観測では『ひも』は
“点粒子”にしか見えない！



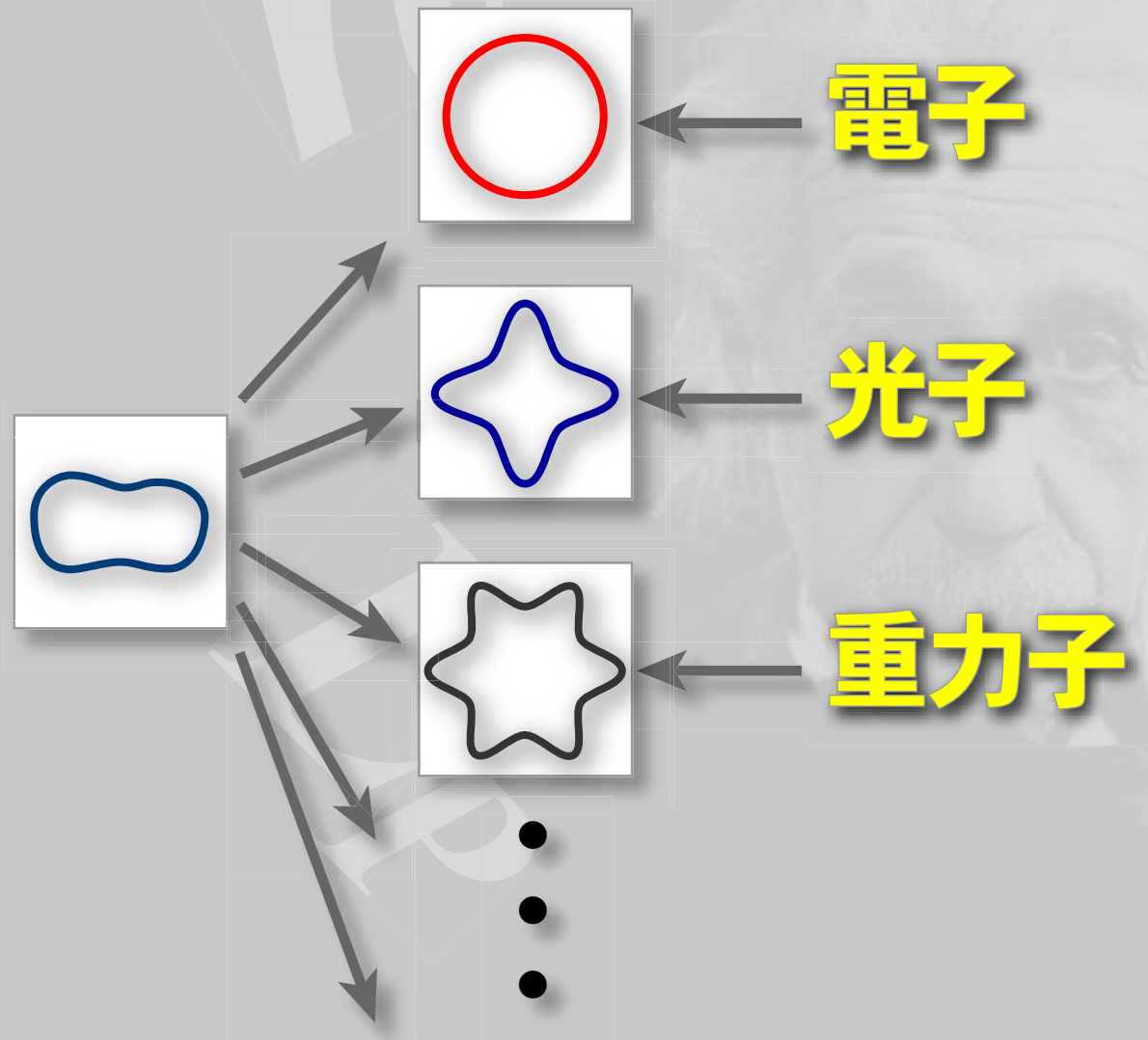
ひもの百面相

様々な振動が可能！



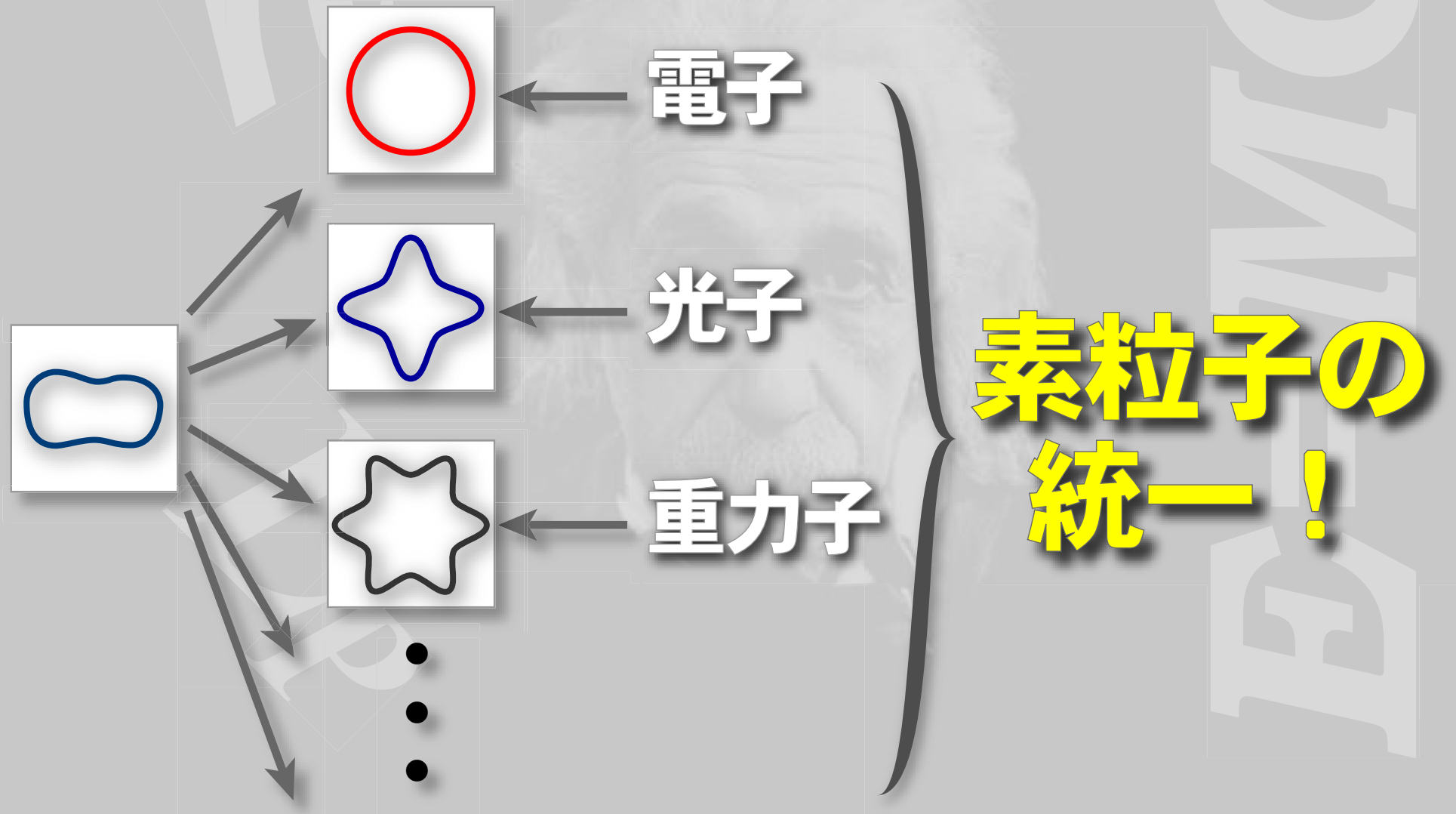
ひもの百面相

異なる“素粒子”として観測

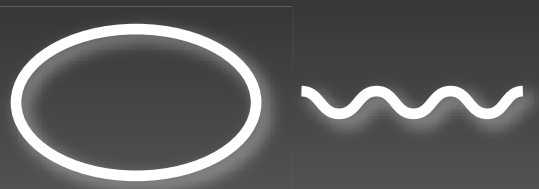


ひもの百面相

異なる“ 素粒子 ”として観測

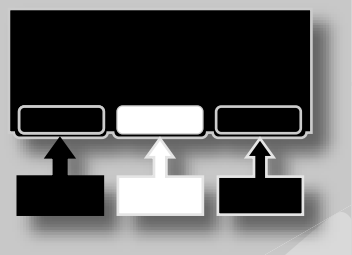


超弦理論???

「ひも」の理論 

素粒子の統一　　超対称性　　最小の長さ

統一　　対称性　　時空

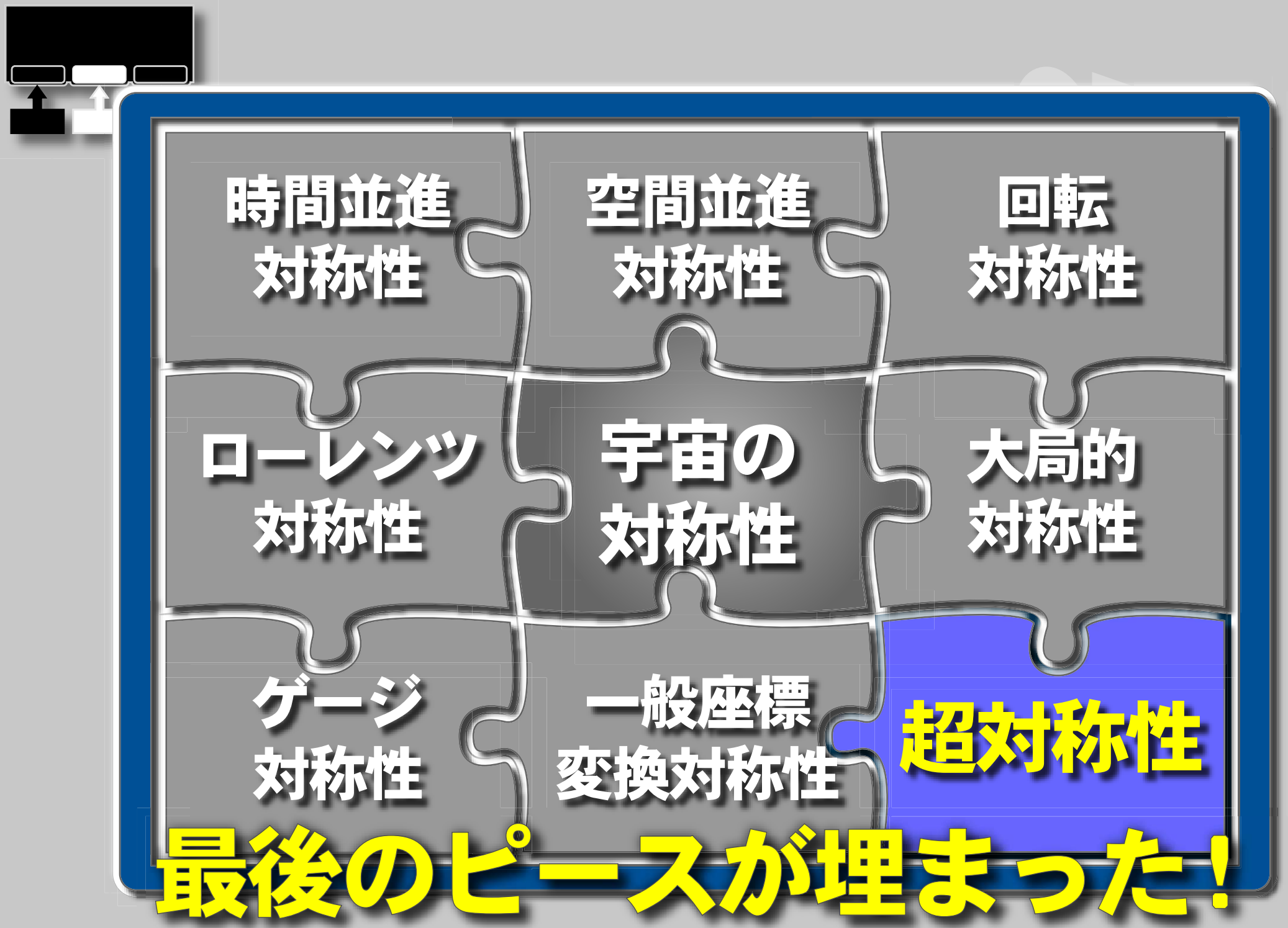


超対称性

ひも

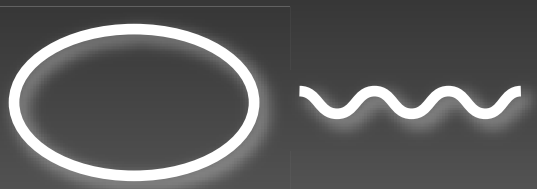
超弦理論

不可分!


時間並進
対称性
空間並進
対称性
回転
対称性
ローレンツ
対称性
宇宙の
対称性
大局的
対称性
ゲージ
対称性
一般座標
変換対称性
超対称性
最後のピースが埋まった!

超弦理論???

「ひも」の理論



素粒子の統一

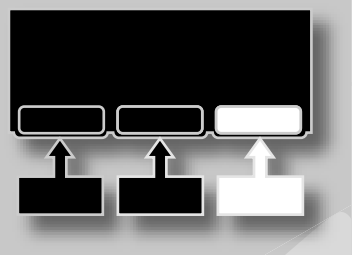
超対称性

最小の長さ

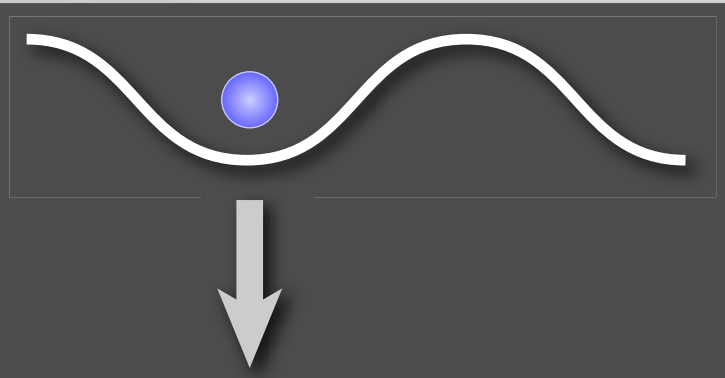
統一

対称性

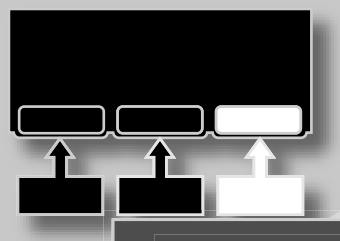
時空

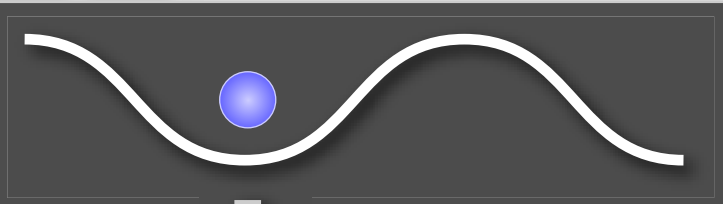


ひもの長さ以下のものは測れない！



小さいものを見るために…

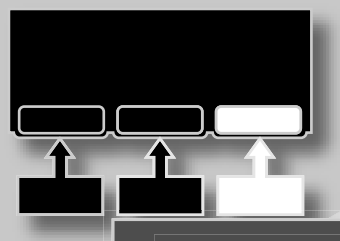


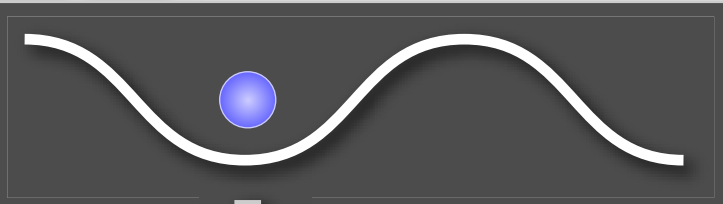


小さいものを見るために…

エネルギーを与えて

波長を短くする



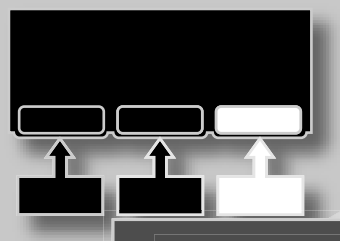


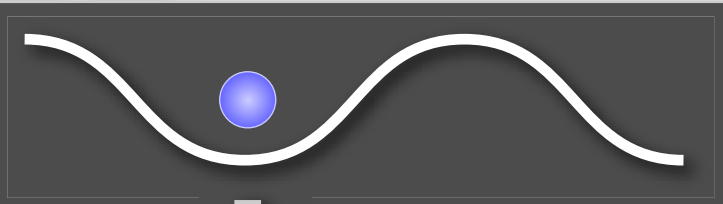
小さいものを見るために…

エネルギーを与えて

波長を短くする

さらにエネルギーを与えると…





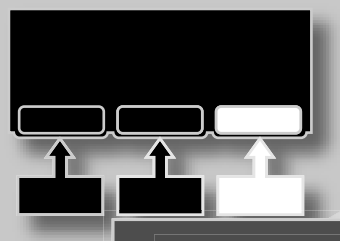
小さいものを見るために…

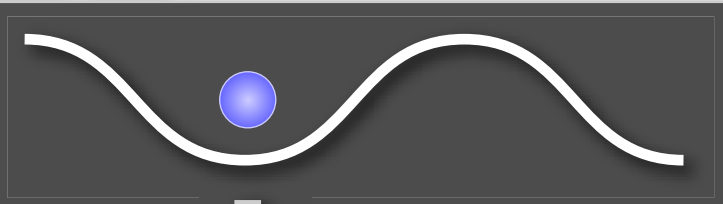
エネルギーを与えて

波長を短くする

さらにエネルギーを与えると…

ひもの長さが伸びてしまう！





小さいものを見るために…

エネルギーを与えて

波長を短くする

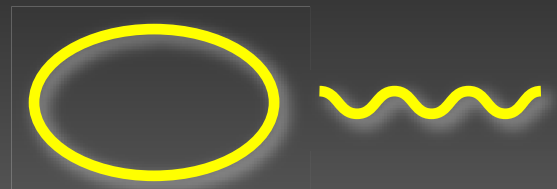
さらにエネルギーを与えると…

ひもの長さが伸びてしまう！

ひもで測れる長さに限界！ → **最小の長さ**

超弦理論???

「ひも」の理論



素粒子の統一

超対称性

最小の長さ

統一

対称性

時空

アインシュタイン

『宇宙について最も理解
できないことは、宇宙
が理解できることだ。』

アインシュタイン

『私には特別な才能などありません。ただ、激しく好奇心が強いだけです。』