

学術俯瞰講義

2. 物質の生い立ち

—素粒子、原子、宇宙—

理学系研究科物理学専攻
ビッグバン宇宙国際研究センター
佐藤 勝彦

「※:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

2. 物質の生い立ち —素粒子、原子、宇宙—

- 講義1 私たちは物質世界をどのように認識してきたか —物質の階層構造—
- 講義2 物質世界はどのように運動するのか —物理法則—
- 講義3 時空 —物質の演舞の舞台—
時空と物質は一体となって運動し世界の構造を決めている
- 講義4 宇宙の創生、進化
—統一的自然観をめざして—

物質世界はどのように運動 するのか —物理法則—

- 古典力学と決定論
- 現代物理学を支える2本の柱 —量子論と相対論—
ここでは量子論、相対論は次回
- 基本法則の統一理論
- なぜ物理法則は美しいのか？

世界は物理法則にしたがって動くのか？

■自由意志を持っている生き物以外は、厳密なルール、法則に基づいて動いている。

しかし、その境界は曖昧。 ウイルスは細胞もたず核酸のみ。化学反応のみ。

単細胞生物の行動を完全に予測はできないが、化学・物理的刺激に対する反応は解明されつつある。

■ヒトは自然世界の法則を知ることで、自然選択のなかで生物学的に成功。

程度の差はあれ、あらゆる生物、動物は同じように、認識しなくても自然選択を通じて法則を巧みに利用（生体は法則を知り尽くしたようにデザイン）。

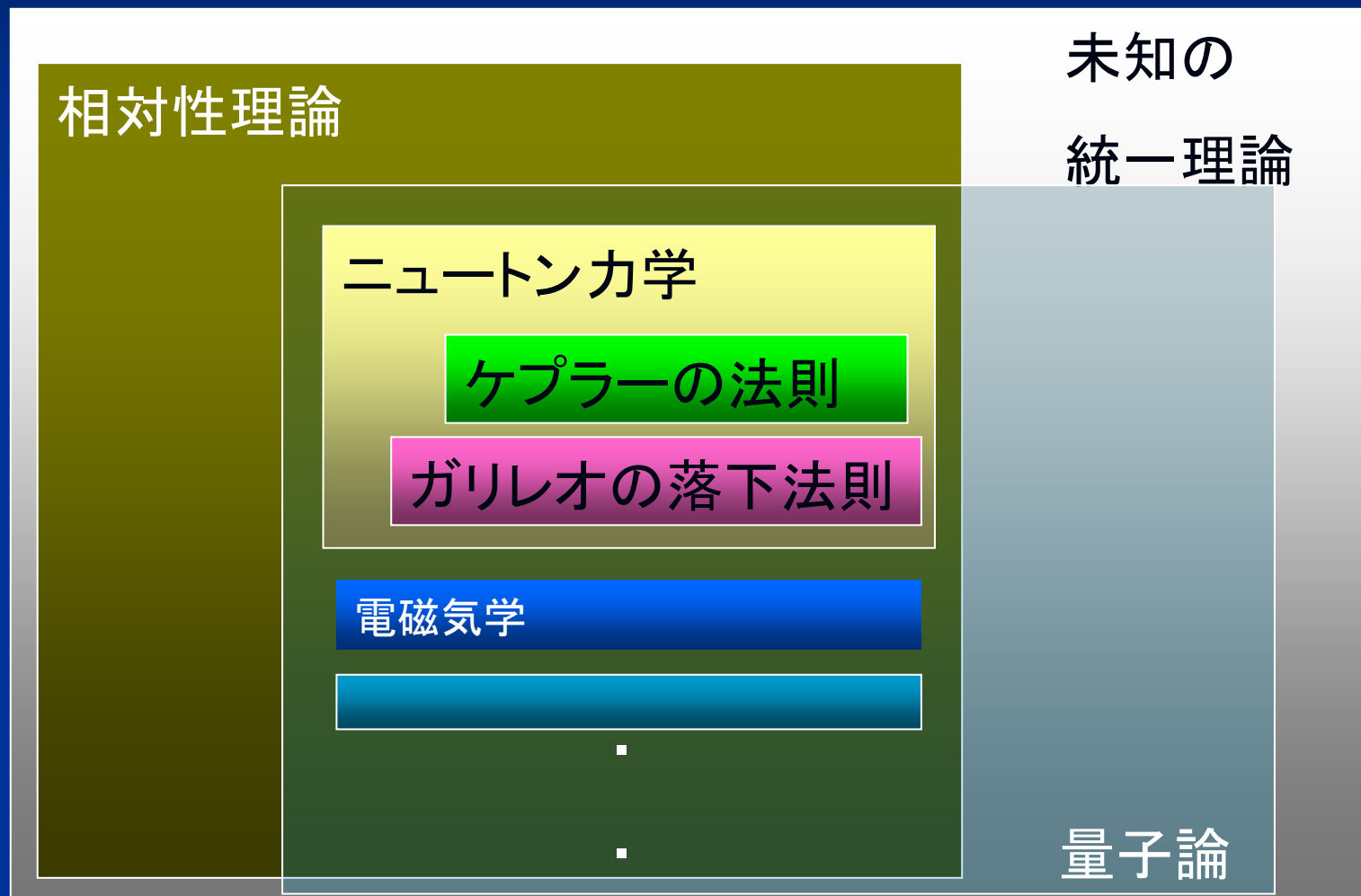
カール・ポパー：この世界の物理法則が自立的なら、我々は自由でない。我々が自由なら、物理法則は自立的ではない。 J.Barrow 「宇宙に法則はあるのか」、より

自然法則・理論

- 人間は自然世界、森羅万象の運動を経験的にまとめ、物理法則(理論)を作った。
 - 物理法則は世界を動かす絶対的原理として存在し、それを発見するのが物理学か？ **物理法則の实在。** (法則は神の存在証明 テイコブラーエ)
 - それとも、物理法則は自然世界を便利に記述するために人間が作る**暫定的な仮説**に過ぎないのか？
- しかし、これまで人間が知った法則は適用限界のある部分的理論である。
- 理論はその理論が真実か誤りか観測、実験で検証できるものでなければならない。

カール・ポパー： 良くできた理論とは観測によって誤りであることが原理的に証明されうる複数の予測をおこなうものである。

物理法則(真理)の階層性



古典力学(ニュートン力学)と決定論

プリンキピア: 自然哲学の数学的原理 (1687)

運動方程式:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F$$

物体の質量 m と、その加速度 $d^2 x / dt^2$ の積は力 F に等しい。

投げたボールの落ちる場所は、初期条件
①投げた場所、②初速度 が与えられれば
完全に予言できる。

すべての運動方程式は微分方程式

初期条件さえ与えれば、それ以後の時間発展は何の不確定もなく、完全に決まる。

宇宙創生の瞬間にあたえられた「神の最初の一撃」によって、以後の宇宙の発展は完全にきまってしまう。

地のはじめの土より、最後となる人がつくられた。そして
まっ先に、最後の収穫のための種がまかれたのだった。げに、
宇宙最後の夕暮れにうたわれる詩は、宇宙創生のその朝に
詠まれたものなのだ。

「ルバイヤード」より。カイヤム（ペルシャの詩人、文学者）

日経サイエンス '83年 宇宙の未来 ダイカス等(佐藤、寺沢訳)より引用

19世紀末、物理学は終わったと考えられていた。

ニュートン力学： 力学的自然観の成立

解析力学： 最小作用の原理による運動方程式、正準理論
ラグランジュ、ハミルトンによる極めて美しい定式化。

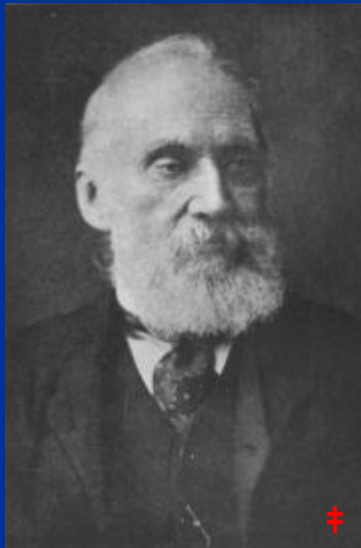
電磁気学： 電気、磁気、電磁力の統一的理論の完成
マックスウェル方程式

熱力学： 偏微分方程式による極めて美しい定式化

物理学は完成し、もはや深まることはなく、
後は広く応用するのみ。

In 1900, Lord Kelvin gave a lecture “*Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light.*”

“*beauty and clearness of theory*” was overshadowed by “*two clouds*, the null result of the Michelson-Morley experiment and the problems of blackbody radiation.”



ケルビン卿
ウィリアム・トムソン

19世紀末、ケルビン卿は19世紀物理を覆う2つの暗雲（エーテルの未検出、黒体輻射の発散）の存在を指摘した。それらは現代物理学を支える2本の柱、相対論、量子論への鍵だった。

現代物理学を支える2本の柱

— 量子論と相対論 —

- 量子論・相対論という 2本の柱の上に現代物理学の大系が構築された。
- この上(特に量子論)に諸基礎科学、応用技術が花開き、人間社会に革命をもたらした。

地球環境

農業

医療技術

情報通信

原子力発電

原爆・水爆

天文学

化学

生物学

半導体

核エネルギー

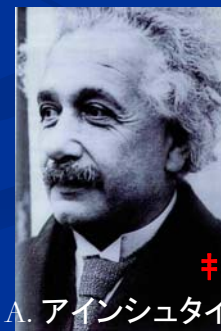
量子論なしでは生きていけない

量子論がもたらしたもの



現代物理学の大系

量子論



相対論

量子論とは？

—ミクロの世界を支配する物理法則—

- 物質は粒子であると同時に波である。

物質粒子の運動は波の伝わる方程式を解き、確率的に求める。

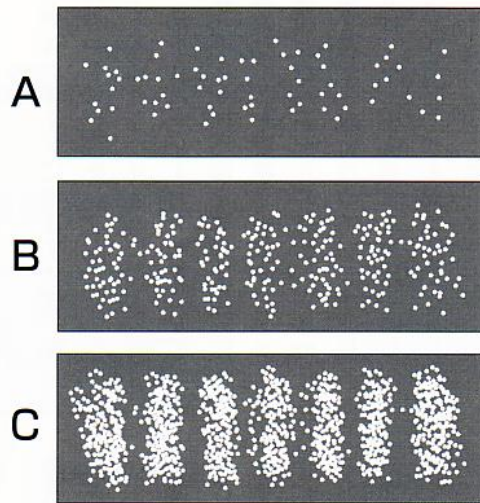
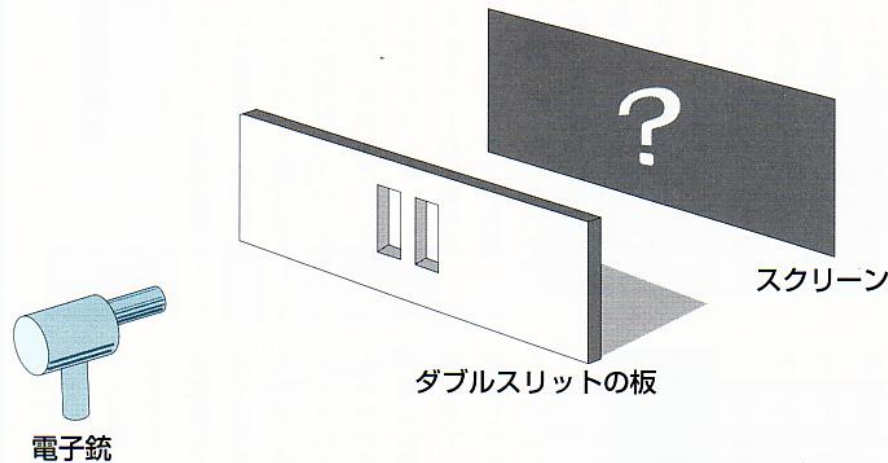
- ハイゼンベルグの不確定性原理: $\Delta x \Delta p > h$

粒子の位置(x)と運動量($P=mV$)はある範囲でしか同時に決まらない。
h: プランク定数

物理法則は物質世界の運動を確率的にし
か予測できない。 決定論は成り立たない。

一個の電子でも波として干渉する。

電子のダブルスリット通過実験



初めのうちは電子の到達場所はバラバラに見えるが…

発射する電子の数が増えてくると縞模様らしきものが現れてきて…

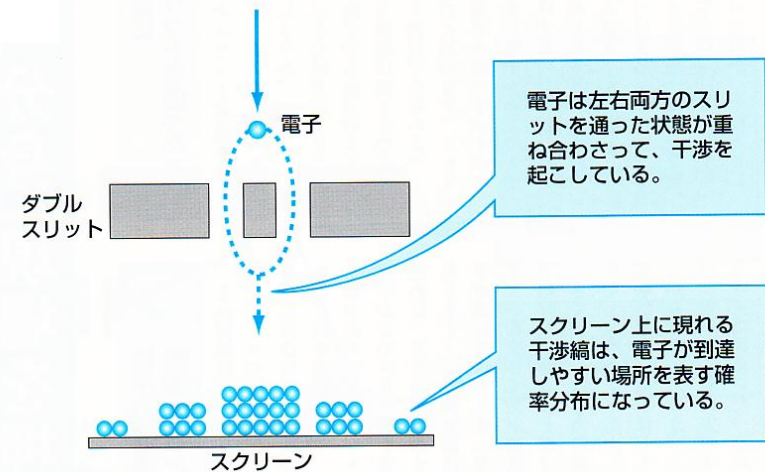
ついにはスクリーン上にくっきりとした干渉縞が出現する。



電子ビームを十分に弱くして、電子を1個ずつ発射しても、結果は同じになるよ。つまり電子は1個でも波のようにふるまうんだ。

電子忍法分身の術!?

図1 自分自身と干渉する電子



この波はいったい何だろう？

一個の電子でも、波のように干渉するのに、
観測した結果は一カ所にある？



「波の収縮」と「確率解釈」によって電子の不思議なふるまいを理解する方法が、私たちが主張する「コペンハーゲン解釈」なのだ。

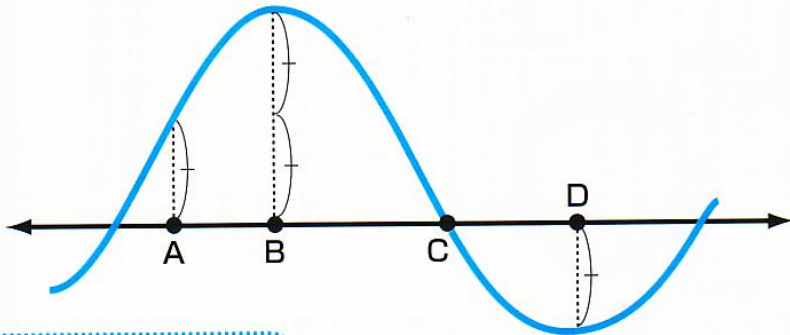
現在の正統的解釈

≠

コペンハーゲン解釈と波の収縮

波の高さは発見確率に比例する

波動関数の確率解釈



電子がA点で発見される確率が10%である場合

↓
B点での発見確率は40%、
C点での発見確率は0%、
D点での発見確率は10%
になる。

複素数である波動関数 ψ の値の2乗^{*}が、その場所に電子を発見する確率に比例するんだ。

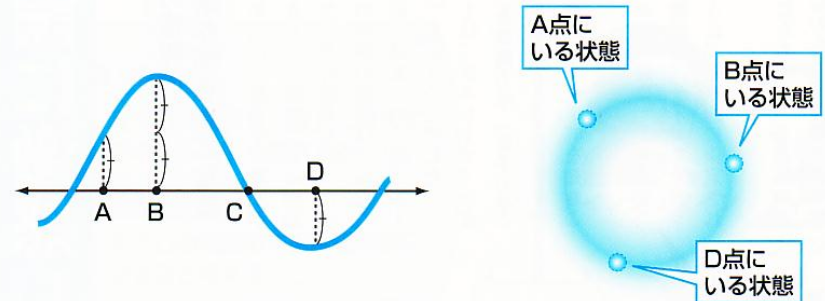
※正確には波動関数 ψ の「絶対値」というものを2乗したものになる。

ボルン



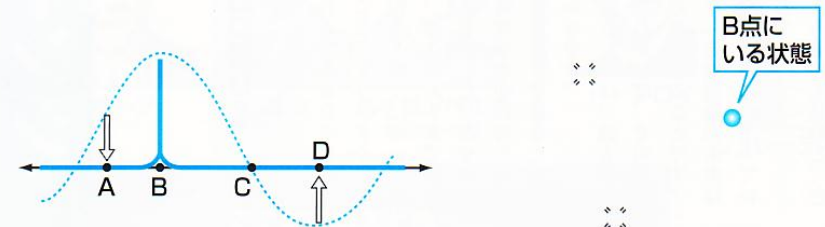
広がっている波と収縮した波

波が広がっている状態



私たちに见られる前の電子の波はさまざまな場所に広がっている「重ね合わせ」の状態にある。

波が収縮した状態



私たちが電子を見た途端に電子の波は1点に収縮して、電子はどこか1か所で発見される。

量子論とは？

—ミクロの世界を支配する物理法則—

- 物質は粒子であると同時に波である。

物質粒子の運動は波の伝わる方程式を解き、確率的に求める。

- ハイゼンベルグの不確定性原理: $\Delta x \Delta p > h$

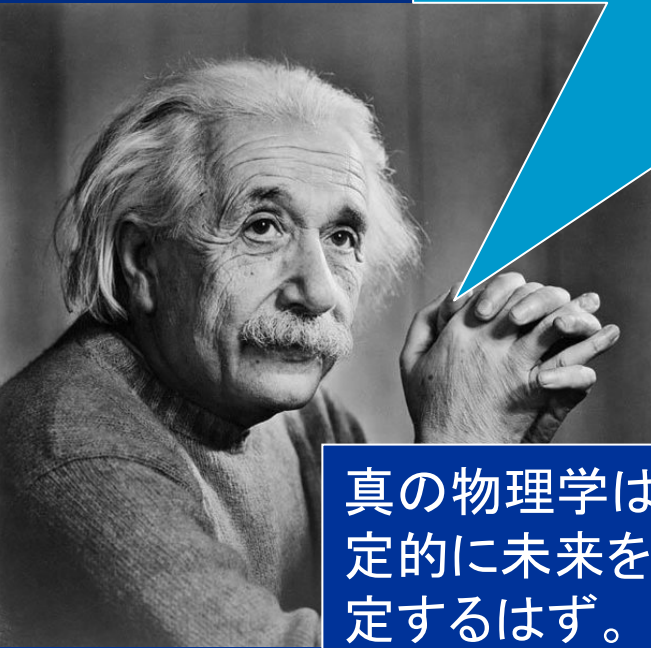
粒子の位置(x)と運動量($P=mV$)はある範囲でしか同時に決まらない。
h: プランク定数

物理法則は物質世界の運動を確率的にし
か予測できない。 決定論は成り立たない。

解釈問題: 量子論は計算どおり正しい結果を与え、実用的に
何ら問題ないが、その波の解釈には困難がある。
波は観測すると収縮するのか？

1. 波は確率の波なのか？

神はさいころを振りたまわず



真の物理学は確定的に未来を決定するはず。確率的に見えるのはまだ量子論が不完全だから。

未来はサイコロが決める？



神様がサイコロ遊びをするはずがない!!

次に電子が見つかる場所は…1の目が出たからA点にしよう

アインシュタイン



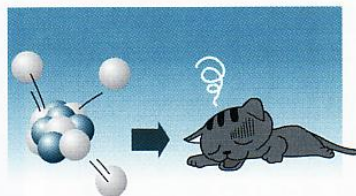
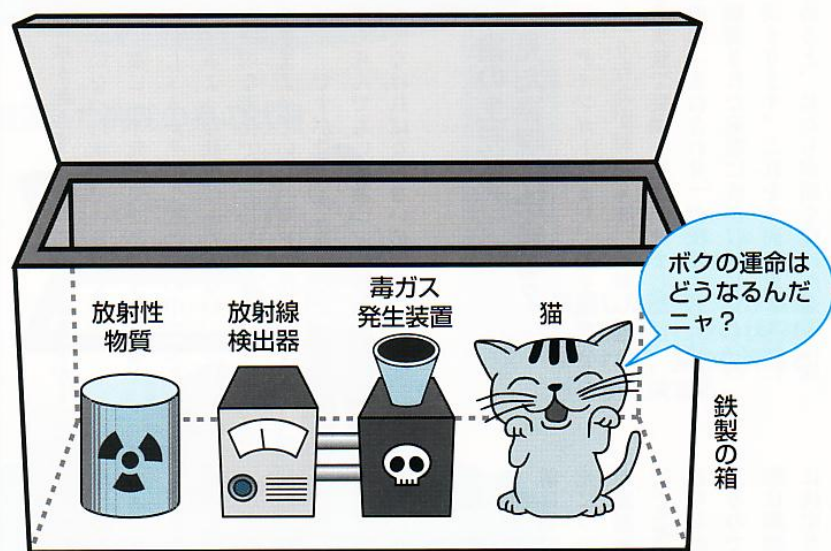
佐藤勝彦 2000「量子論」を楽しむ本」PHP研究所 p.143

S. Hawking: 証拠という証拠が神はギャンブルの常習者で、ありとあらゆる機会にさいころを投げていることを示しています。 (「時間順序保護仮説」 1991 より。)

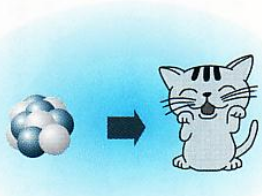
2. 波は観測すると収縮するのか？ 観測するまで重ね合わせの状態？

シュレーディンガーの猫

シュレーディンガーの猫



放射性物質が原子核崩壊を起こせば
毒ガスが発生して猫は死ぬ。



放射性物質が原子核崩壊を起こさなければ
毒ガスは発生せず、猫は生きている。



シュレーディンガー

私たちが箱の中を見る前から
猫の生死はどちらか一方に決
まっているはずだ。
だから「生と死が重なってい
る」とか「観測したとたんに生
死が決まる」と考える量子論
はおかしいよ。

+

佐藤勝彦 2000「量子論」を楽しむ本 PHP研究所 p.197

猫の生死はどうなっている？

図1 観測前の猫の状態



観測する前の猫は生きて
いる状態と死んでいる状
態が半分ずつ重ね合わせ
になっている。

図2 観測した瞬間の猫の状態



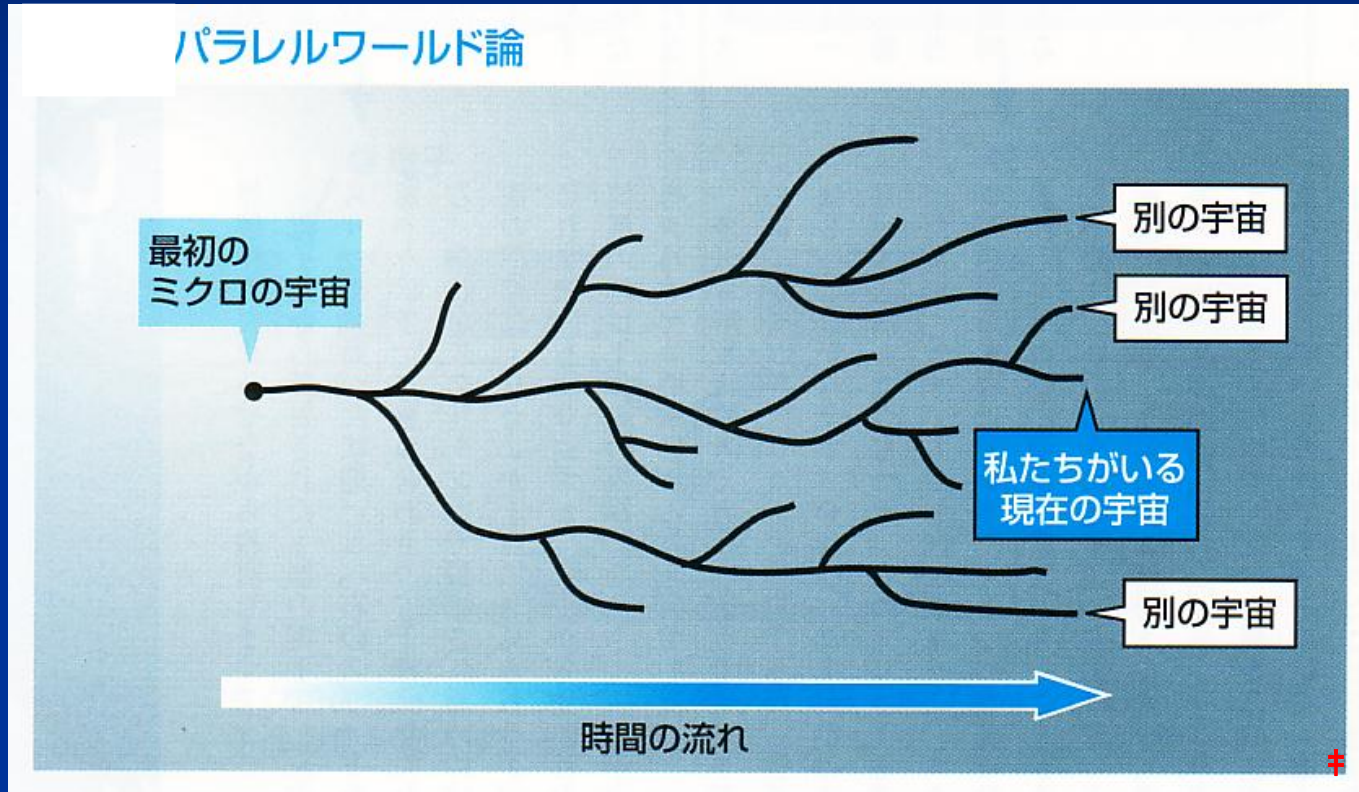
観測した途端に波が収縮
して重ね合わせの状態が
解かれて、猫の生死はど
ちらかに決まる。

+

量子力学の多世界解釈

(H.エヴァレット、非主流)

- 世界(宇宙)はこの確率に従って無限に分岐を続ける。



佐藤勝彦 2004「図解量子論がみるみるわかる本」 PHP研究所 p.79

世界は無限にあり、“あなたも”、それぞれの人生は異なるものの、それぞれの世界に存在している。

多世界解釈は、奇想天外。

しかし波の収縮を考えなくてもよい論理一貫した解釈。

- シュレンディングーの猫は波の収縮を考えなくても理解できる。
- 相対論が許すタイムマシンが存在しても、親殺しのパラドックスを回避できる。(次回)
- 最近の宇宙論は 宇宙は無限に存在するという、無量宇宙 (Multiverse) を予言。

リチャード・ファイマン：「相対論を理解している人は12人だけと新聞に書かれた時代があったが、そんな時代があったとは思わない。・・・しかし、量子力学となると、だれも理解していないと言ってもだいじょうぶだと思う。」

「宇宙に法則はあるのか」 ジョン・D.バロウ著 松浦俊輔訳 青土社 2000 より

宇宙の進化？ 自由意志の問題？

■ 観測者、被観測世界の二元論は破綻。

観測者も宇宙の一員。量子宇宙論では、宇宙の波動関数は(微分方程式に従い)決定論的に進化。しかし出来事は確率的。

■ 量子論的確率により多様な世界が実現：

縦糸である物理学の基本法則にしたがって物質は運動するが、量子論的確率により多様性？ 物理法則の数学的構造(複雑系の科学：自発的対称性の破れ、自己組織化、散逸構造、アトラクター、カオス、..)が**横糸**となって、この美しい物質世界を織りなしている。

■ 自由意志：量子論によってもはや決定論的である問題はなくなった。脳は化学反応レベルでは量子的確率によって決定論的ではない。しかし、宇宙の多様性と同様に物理法則の数学的構造から生まれるのだろうか？

R.ペンローズ：意識は脳全体の広範囲な領域に広がるものだ。意識の原因となる物理過程もそのはずだ。量子的干渉はこの条件を満たしている。

「心は量子で語れるかー21世紀物理の進むべき道をさぐるー」

ロジャー・ペンロウズ著 中村和幸訳 講談社 1999より

物理法則の統一理論

- **物理学の真髄**: 自然世界のあらゆる現象、森羅万象をできるだけ簡単な、少ない法則で説明する。
現象ごとに法則を作っても予言性がない。
- 物理学の歴史は、統一理論の歴史とも言える。

①**重力**: リンゴが地面に落下する力と、天体の間に働く力をニュートンは見抜き統一。

②**電磁力**: 磁石の力、磁力と 電荷に働く力、電気力を最終的にマックスウェルが統一。

物理学の基本法則の統一

アインシュタインの夢： 統一場理論 (1932)

①重力と②電磁力の統一によって、一つの法則で物質世界の運動を解き明かす。

あまりにも時期尚早： 森羅万象、重力と電磁力により運動しているように見えたが、基本的な力は まだ2つ在った。

原子核の中で働いている③弱い力と④強い力

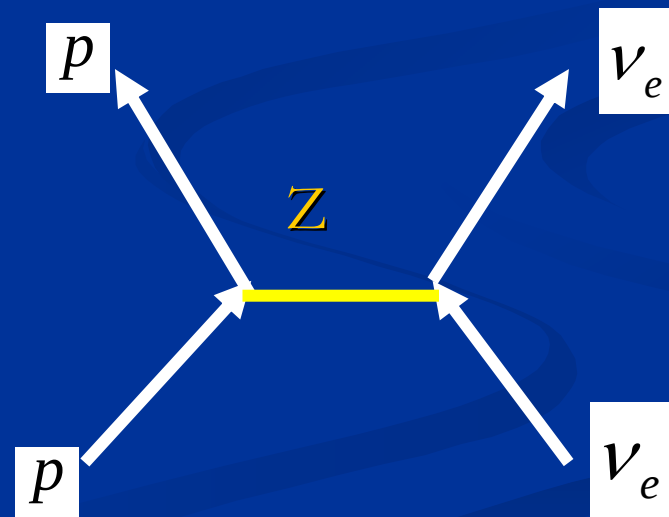
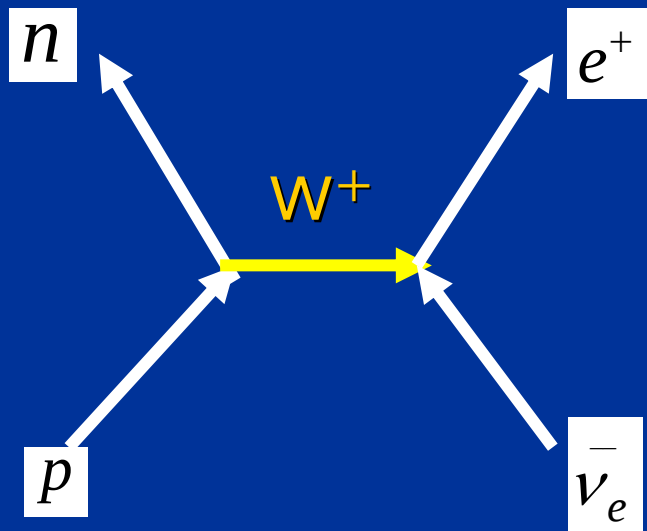
③弱い力

- 弱い力： ベータ崩壊を引き起こす力

例： 中性子のベータ崩壊 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

W^+ , W^- , Z ボソン が媒介

ニュートリノ は弱い力と重力しか働かない。



カミオカンデの超新星ニュートリノ検出例

SNO(カナダ)の太陽ニュートリノ検出例

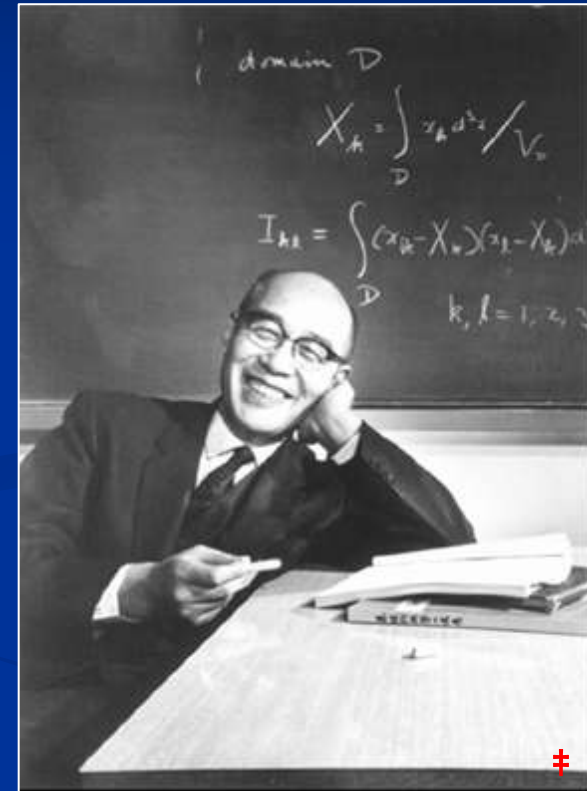
④強い力

- **強い力**: 核子(陽子や中性子)の間に働き、結合して原子核を作る力。

湯川の中間子論(1934):
核子の間を**中間子**が力を媒介

核子も中間子もクォークから作られているので、よりミクロに見ると、強い力はクォークの間に働く力。

グルオンが力を媒介。



日本人初のノーベル賞受賞者

強い力の正体は“色の力”

量子色力学

- 色力学 は 電磁気学の拡張
- 電荷 + - (+ と - で結合すると中性)
色荷 + 赤 緑 黄 の光の3原色
- 反赤 反緑 反黄
(3原色で結合すると中性、
また色と反色で結合すると中性)
- 力を媒介する粒子
電磁気学 光子 1種類
色力学 グルーオン 8種類

註) 色は 力の働く“荷”の性質巧みに表す表現。絵の具の「色」などとは無関係

核子や中間子はクォークの結合

クォークは6種類在るが、それぞれ3色のクォークがある。

アップ
ダウン

u, u, u,
d, d, d,

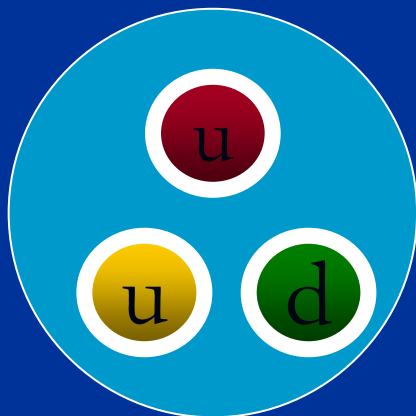
チャーム
ストレンジ

c, c, c,
s, s, s,

トップ
ボトム

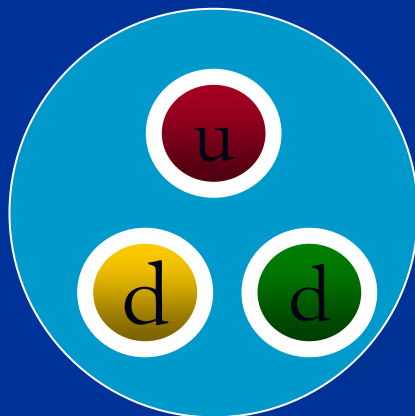
t, t, t,
b, b, b,

陽子



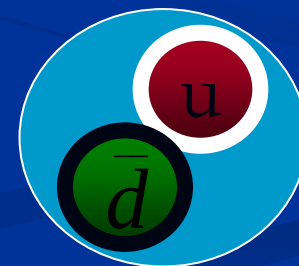
など

中性子



など

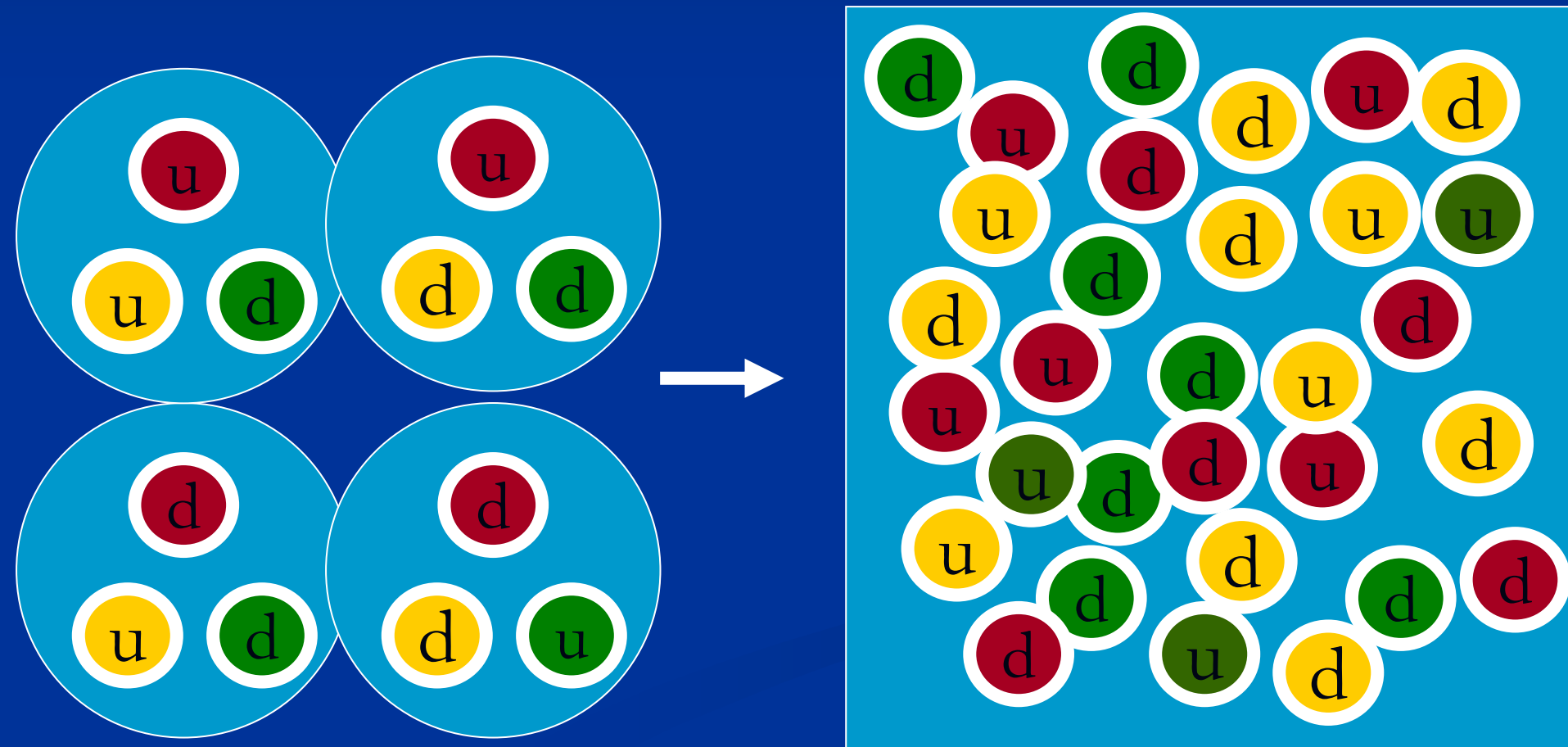
π^+ 中間子



など

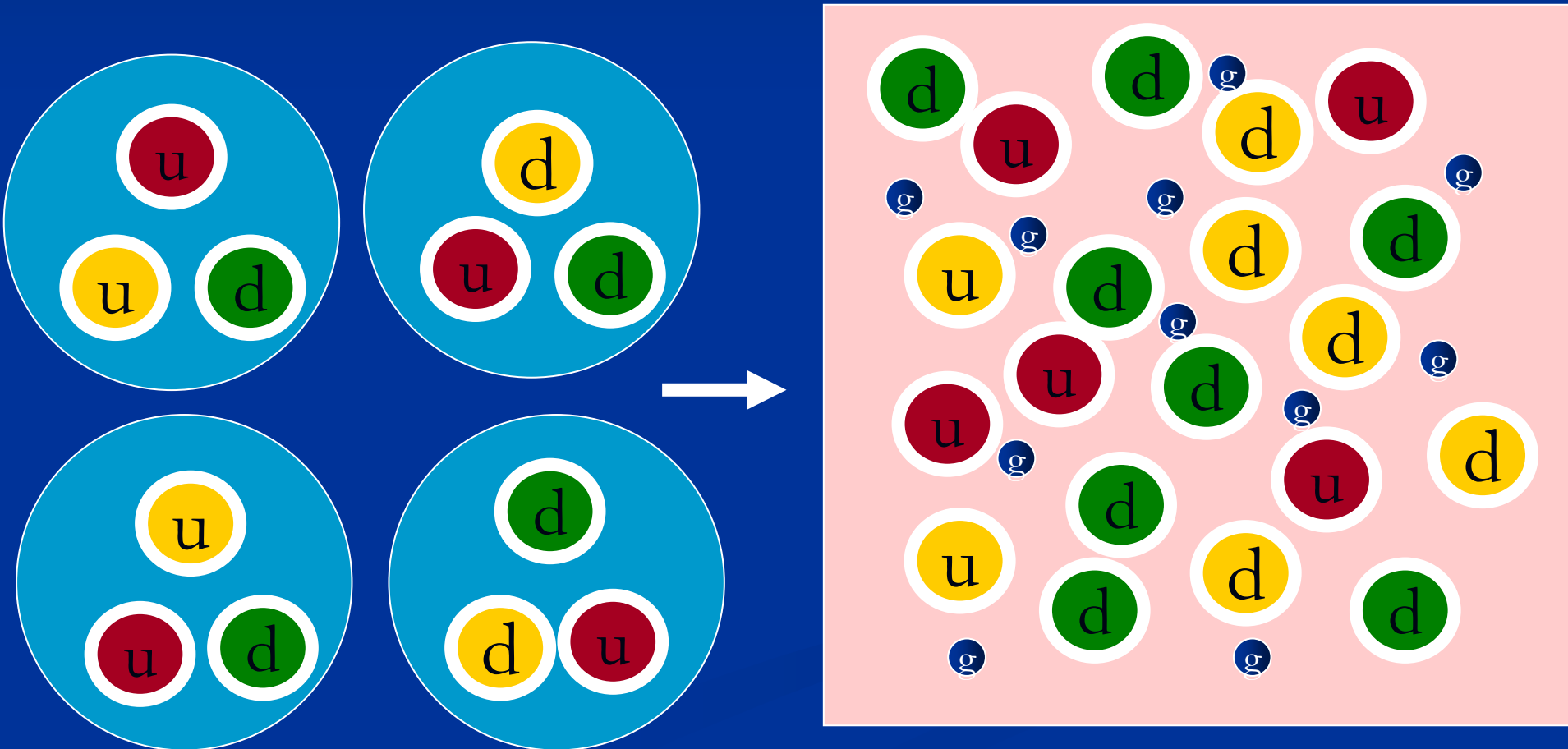
クオーク物質

物質の密度が高くなると核子は重なりクオーク物質になる。
中性子星の中心はクオークかもしれない。 **クオーク星**



クォーク・グルオンプラズマ

宇宙の初期のように、物質の温度が高くなると核子は解け
クォーク・グルオン・プラズマになる。



力の統一理論

—アインシュタインの夢—

自然界を支配している4つの力

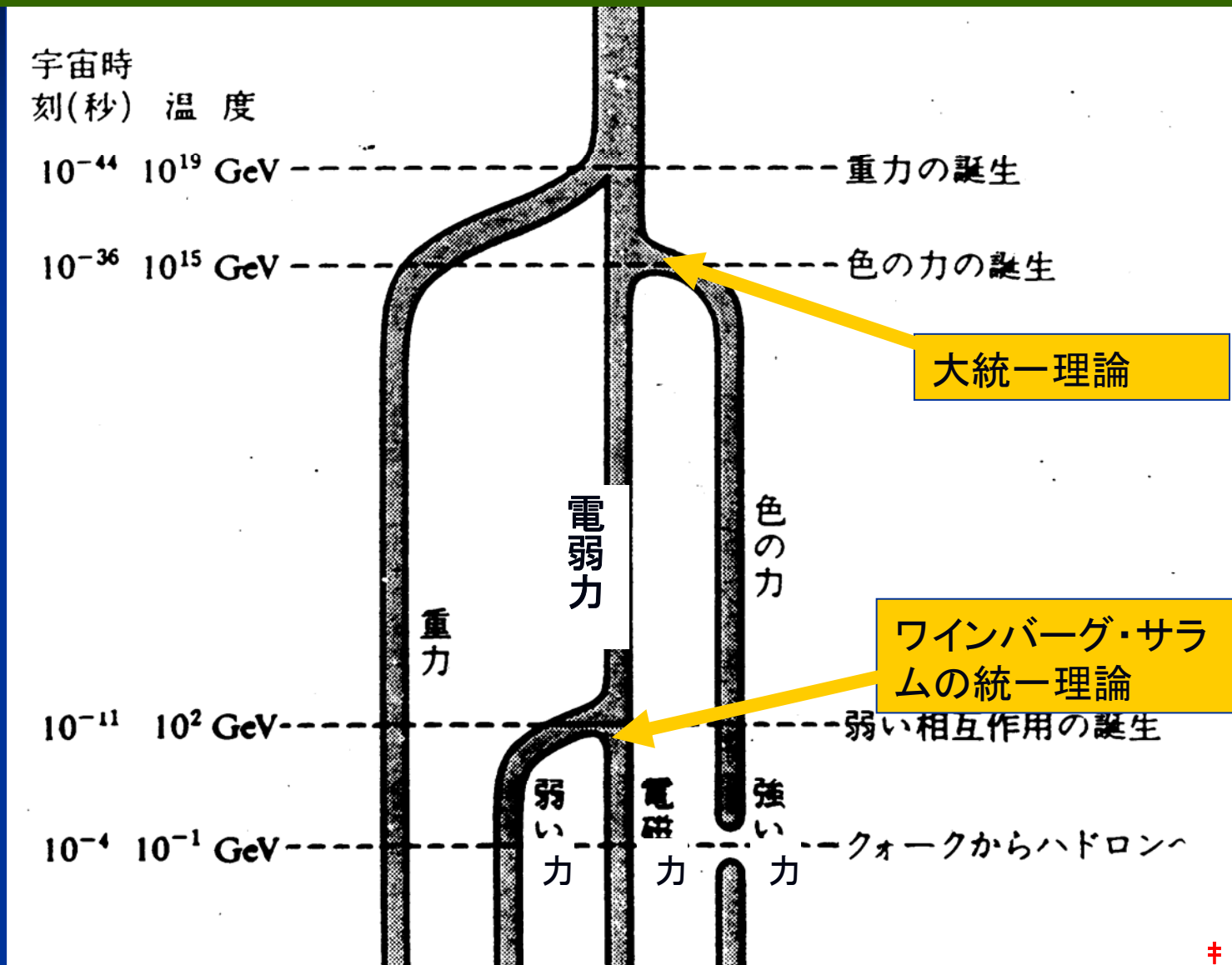
1. 重力
2. 電磁気力
3. 弱い力
4. 強い力

を、ひとつの力に統一する。

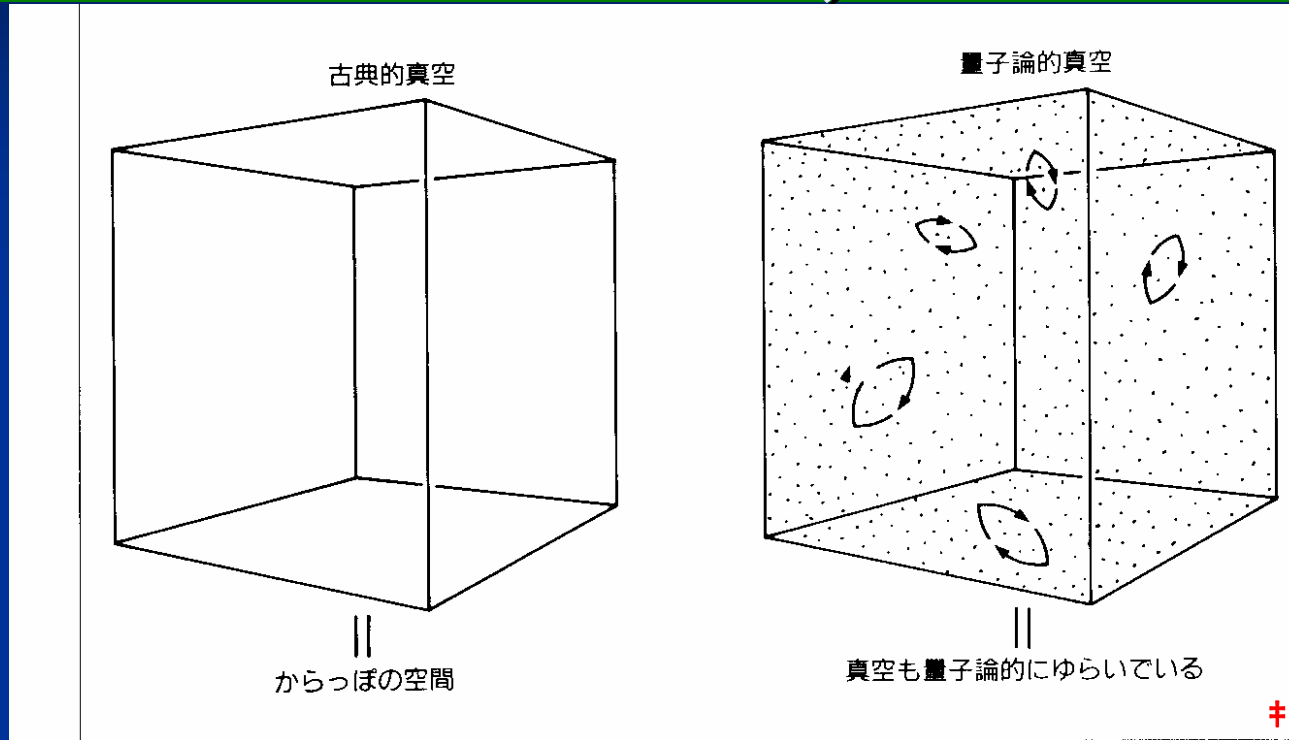
究極の統一理論は未完

- アインシュタイン以後しばらく、統一理論の研究は“はぐれもの”の研究だった。
- 第一段階の統一理論（電磁力と重力の統一ではない）
「電磁力」と「弱い力」の統一理論が成功、
ワインバーグ・サラム理論(1967)、実験的にも確認
(1983) : ノーベル賞(1979)
今やこの2つの力は統一され「電弱力」と呼ばれる。
- 第2段階の統一理論 「電弱力」と「色の力」の統一、
大統一理論 (GUTs) が提唱、しかし実験的裏付けなし。

統一理論の予想する「力の進化」



「真空の相転移」 に、統一理論(WS理論)は基づいている



佐藤勝彦 2003「宇宙96%の謎」実業之日本社 p.137

「真空」も物理学実体である。

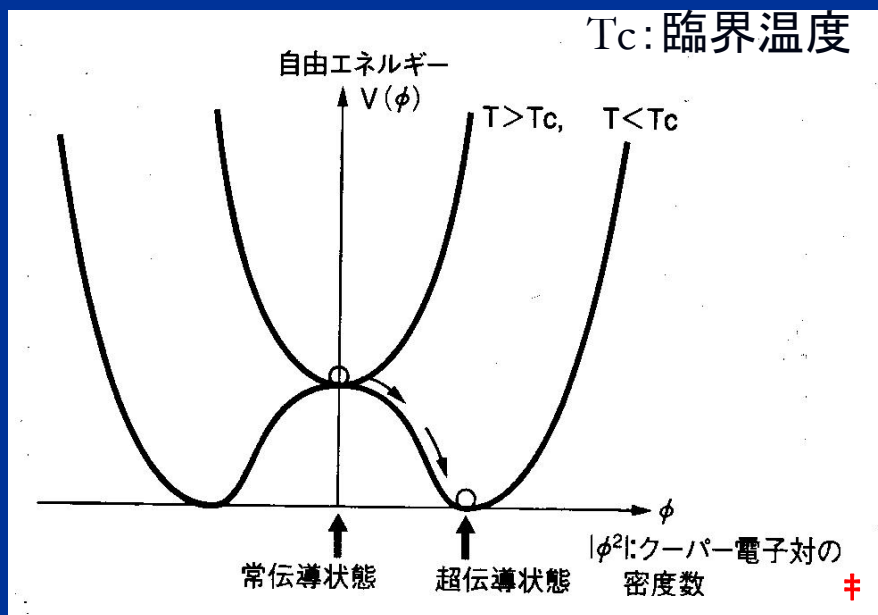
「真空」も水が氷になるように相転移を起こす。

真空の相転移

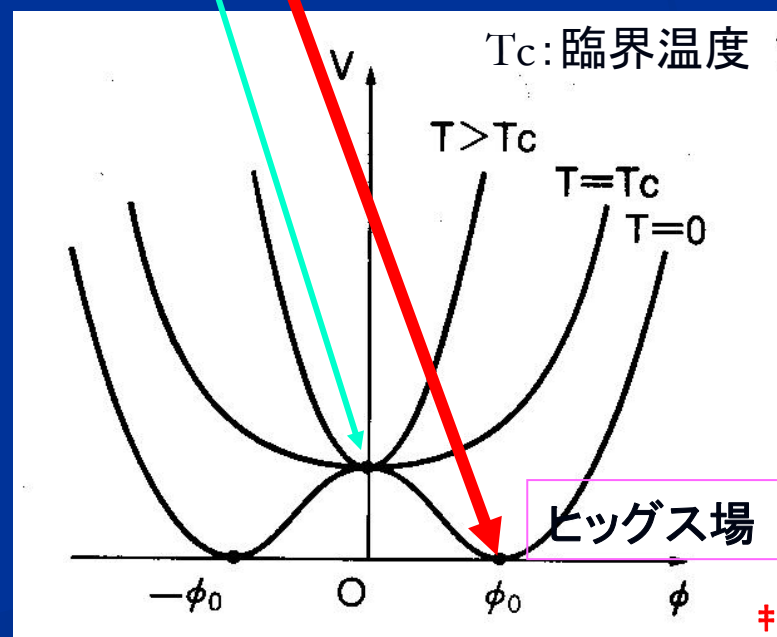
統一理論は「超伝導」理論のアナロジーとも言える。

ギンツブルグ・ランダウ理論では「真空」の自発的対称性の破れにより、光子が超伝導体の内部では「見かけの質量」をもつ。

物性物理学では真空とは基底状態



WS理論では真空の対称性を記述する ヒッグス場 が存在。その自発的対称性の破れにより、もともと質量ゼロ だった、W,Z ボソン が 大きな質量 を持つようになる。



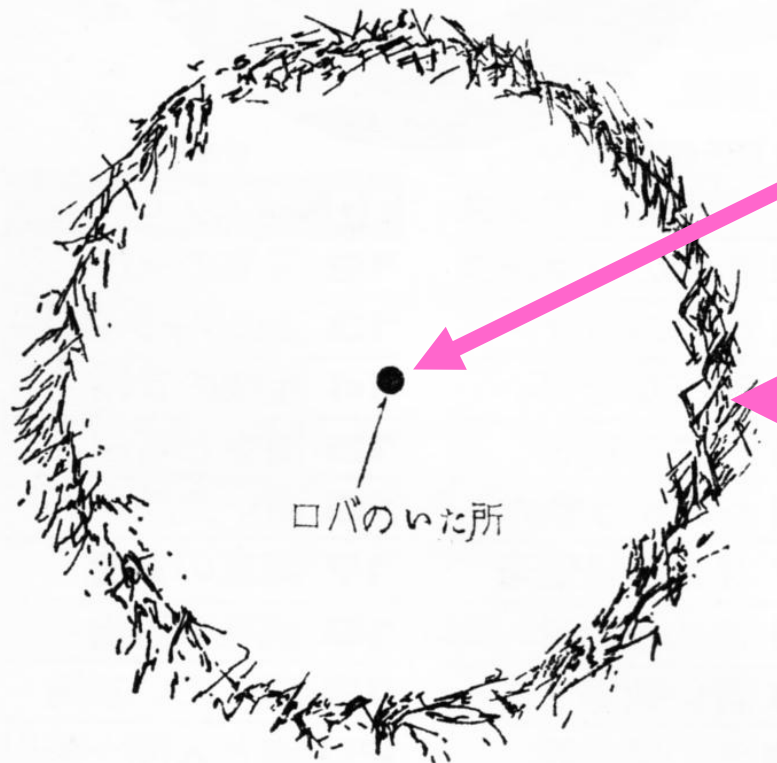
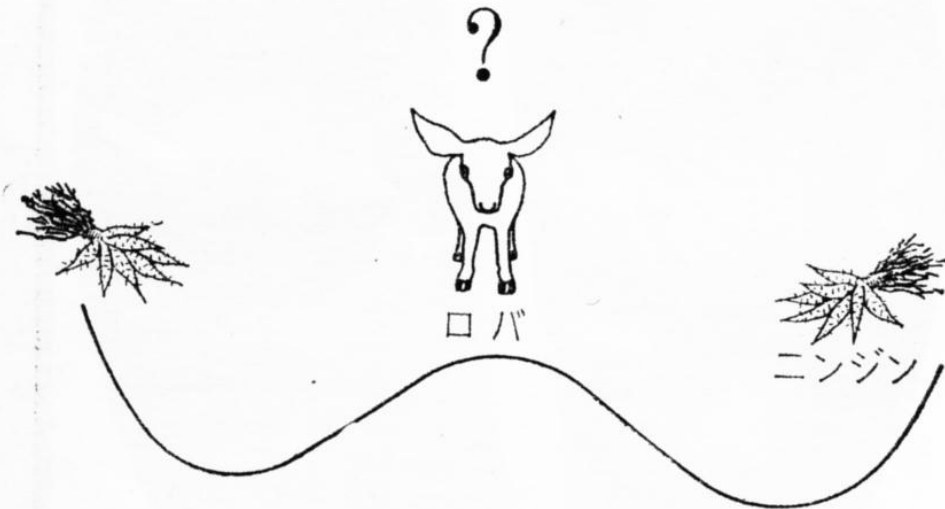
佐藤勝彦 2003「宇宙96%の謎」実業之日本社 p.141

W,Zボソンの質量はおよそ100GeVになり、力のレンジが短くなり、弱くなる。

自発的 対称性の 破れ

物理法則は厳密
に左右対称。

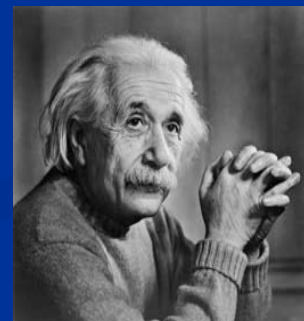
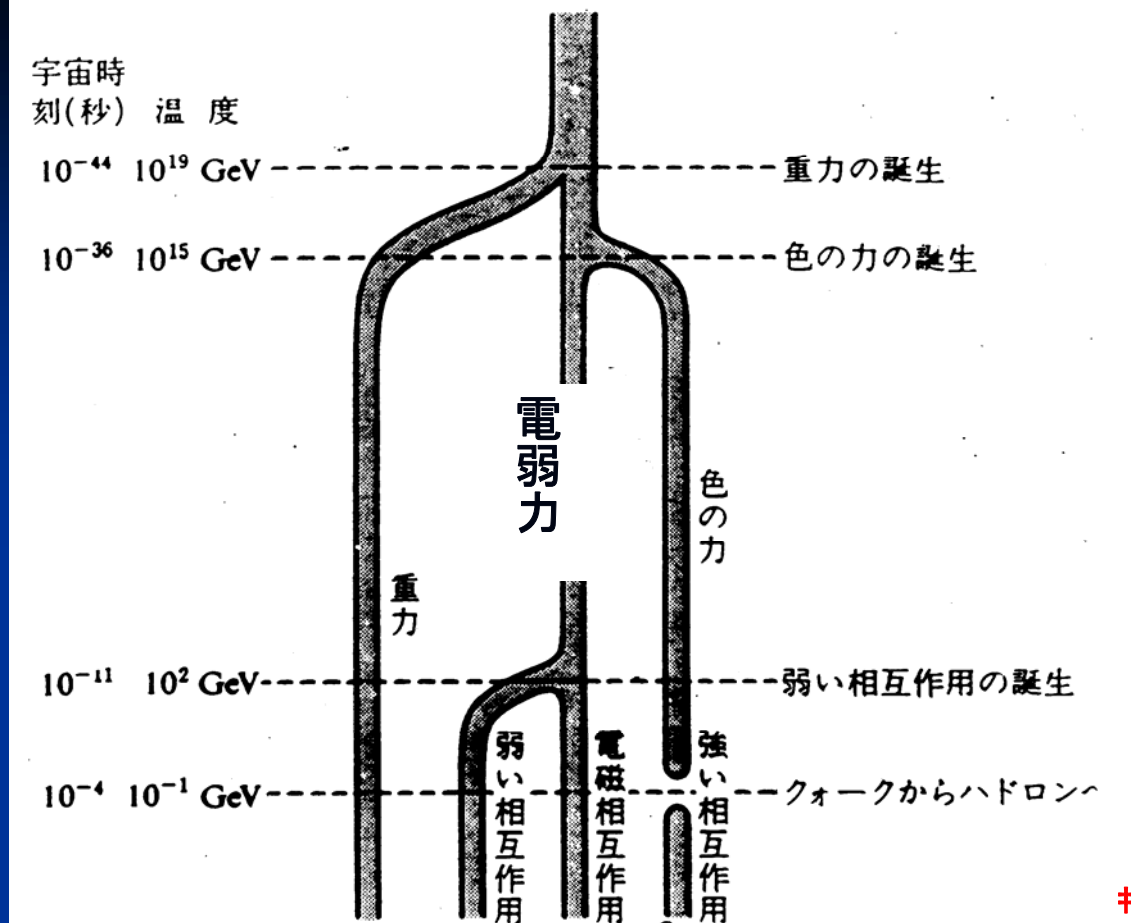
しかし、対称の
状態は不安定で、
左右平等に対称
性は、結局破れ
る。



自然, 佐藤1969より

統一理論の 予想する 「力の進化」

生物の進化と
同じように、
力も枝分かれ
し進化する。



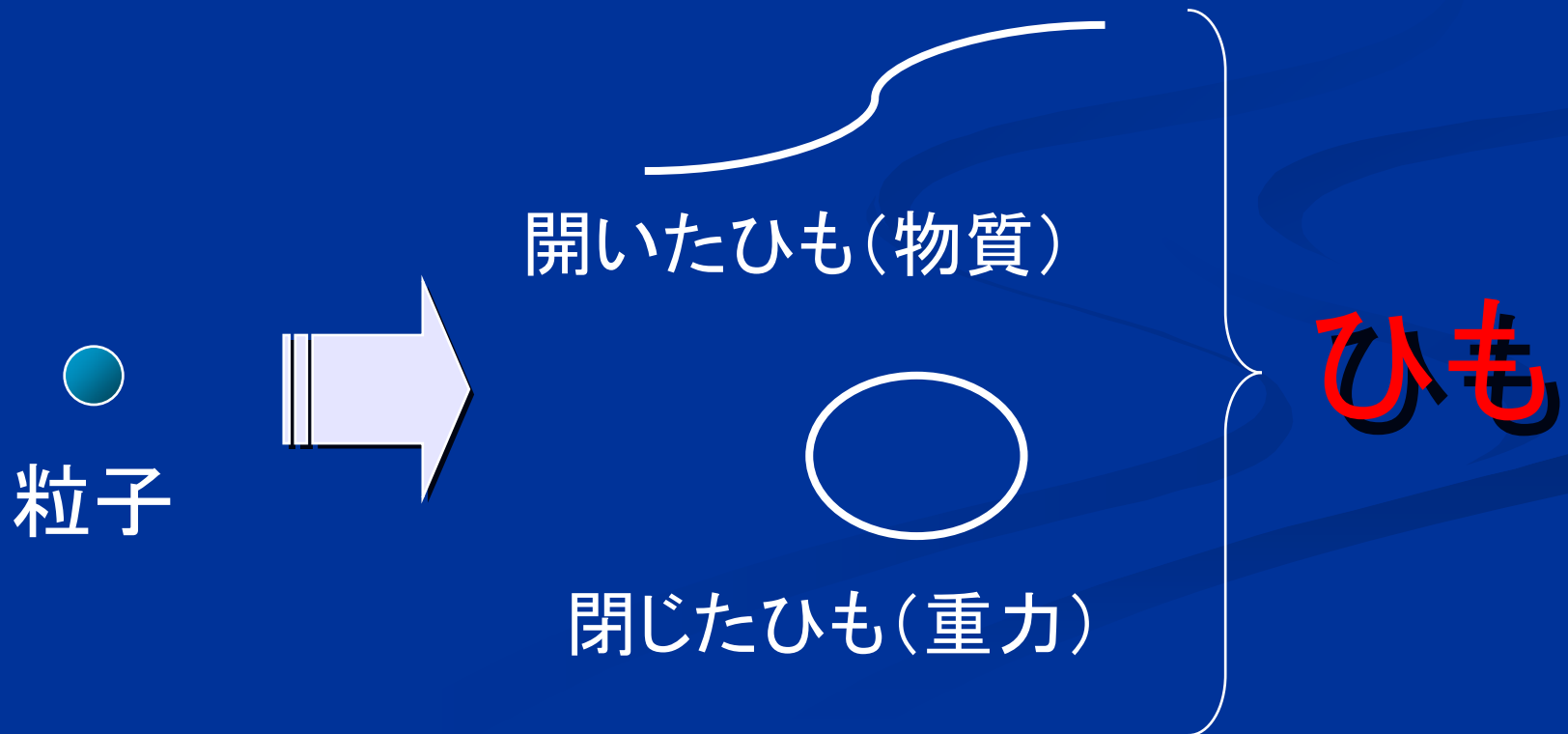
物理学の基本法則も 宇宙の中で進化

宇宙創成時には統一された一つの力しか存在しなかったが、あたかも生物の進化と同じように、次から次へと枝分かれをし、現在の4つの力ができあがったのかもしれない。

しかし、すべての力の統一理論、
万物の理論 (Theory of everything) は未完。

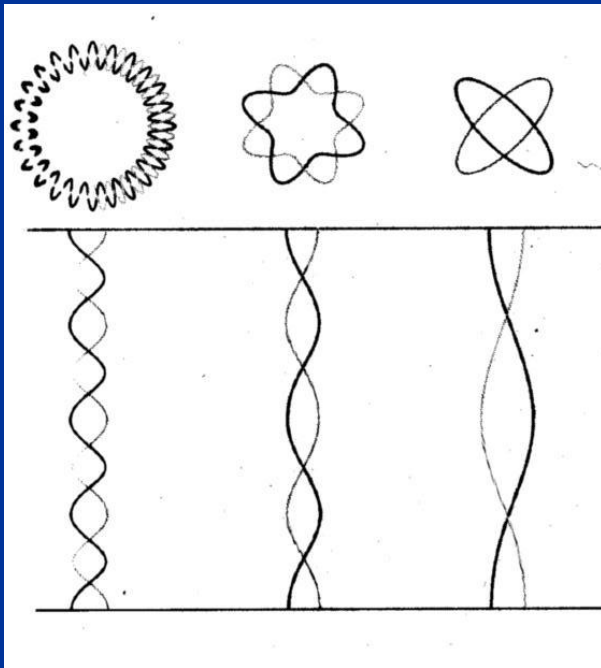
超ひも理論/ブレーン理論

1. 物質粒子も力を媒介する粒子もすべては **ひも**
2. ひもの存在する時間空間は10次元あるいは11次元の高次元時空。

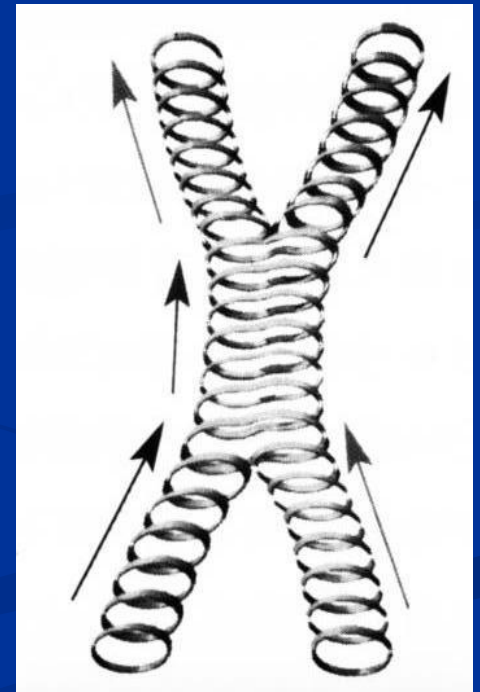
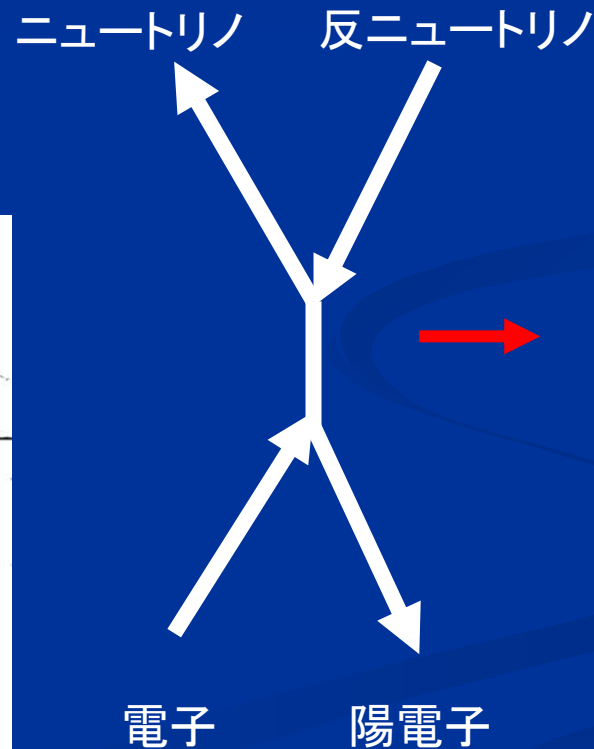


ひもの振動と組み替えにより全粒子と 粒子の反応を説明

粒子の種類や質量

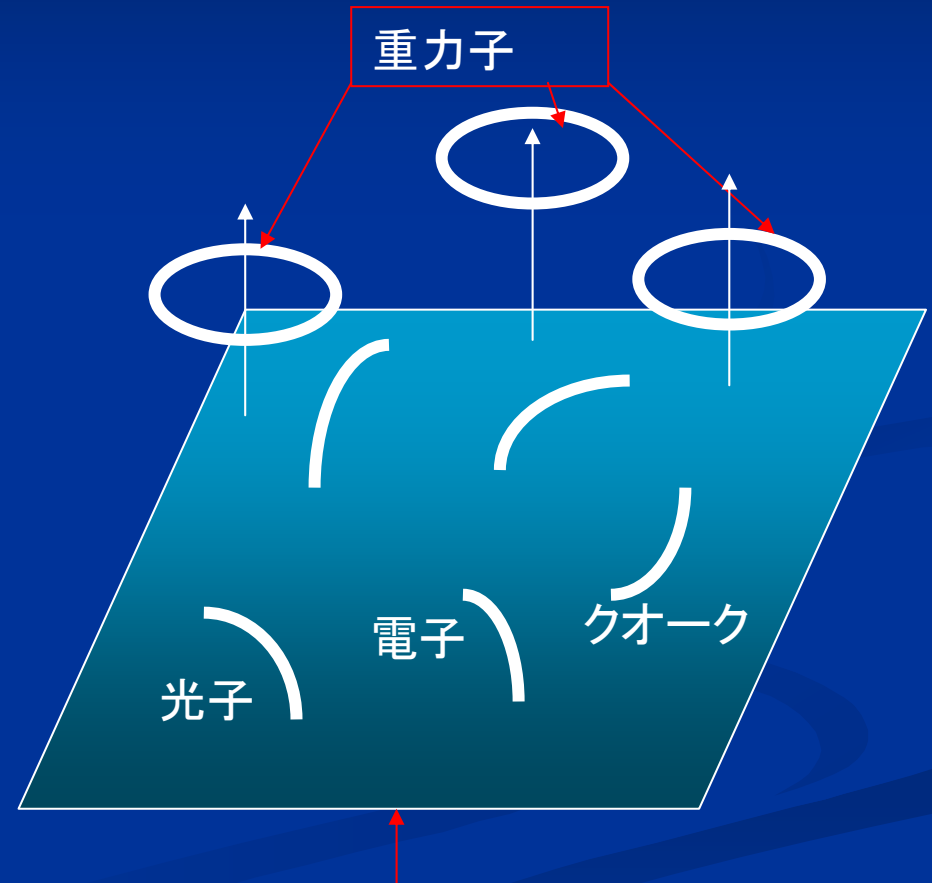


粒子の反応



ブレーン(Brane)理論 (1995)

- **ひも**の端は 膜にくっついており、膜から離れられない。
- 例外は 重力を媒介する重力子 で 輪、閉じたリング。
- 物質はブレーン世界に閉じ込められるが、重力はブレーン外に及ぶ。



ブレーン世界: 10次元中の空間3次元の“膜”が我々の宇宙

微小距離での重力測定

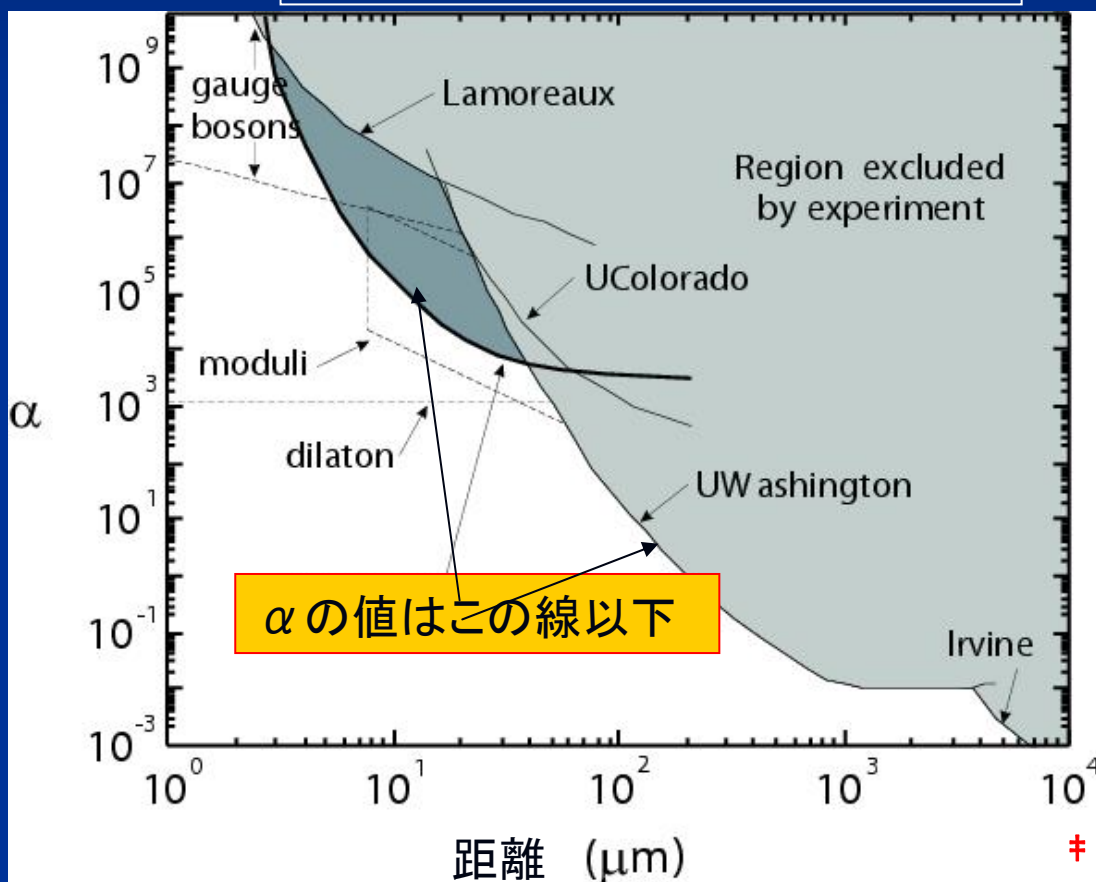
“膜の厚さ” λ より短い距離では重力の法則がニュートンの万有引力からずれる。

重力ポテンシャル

$$V = -G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha \cdot e^{-r/\lambda})$$

α : 重力が余剰次元にもれだす効果。

実験からの α の制限

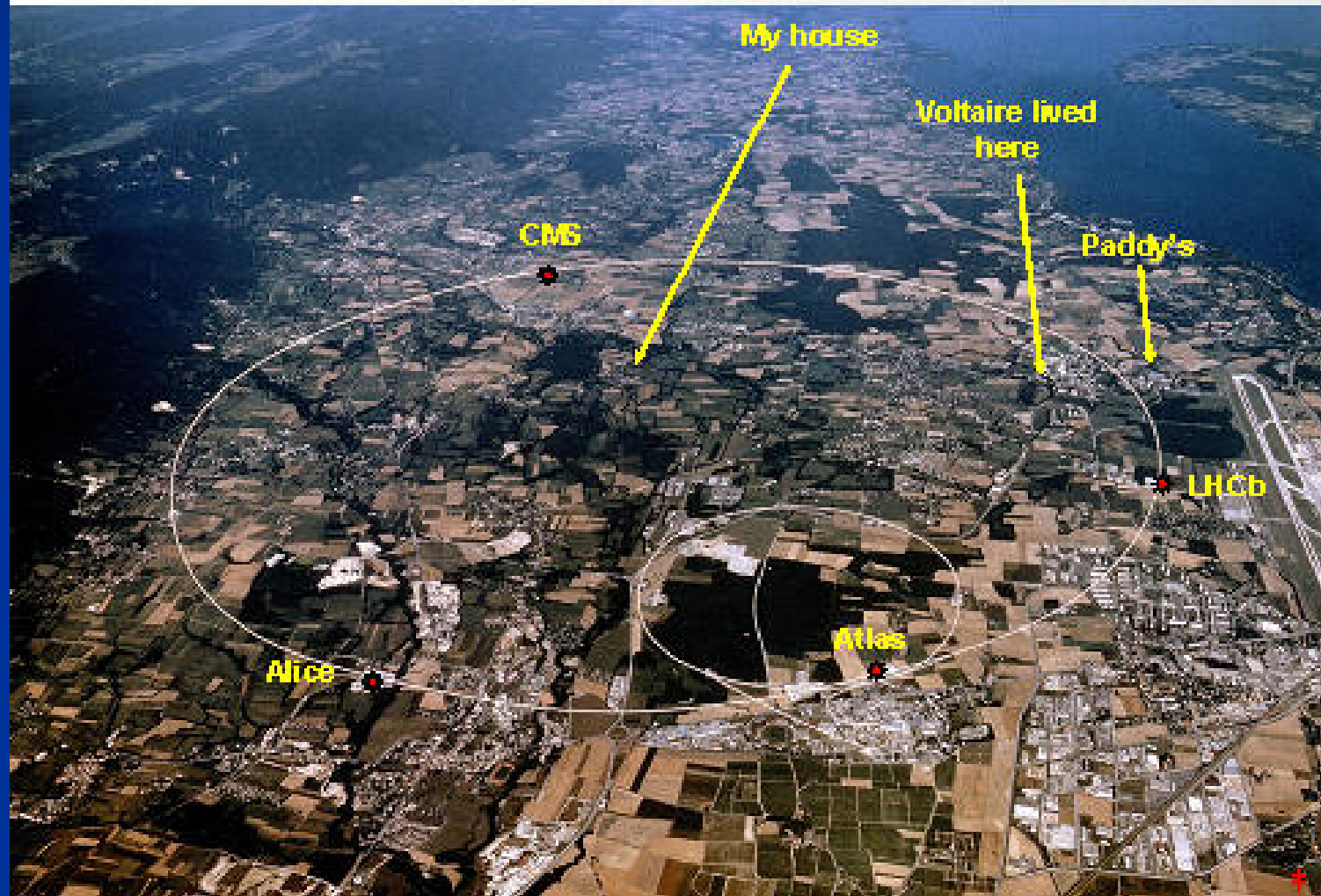


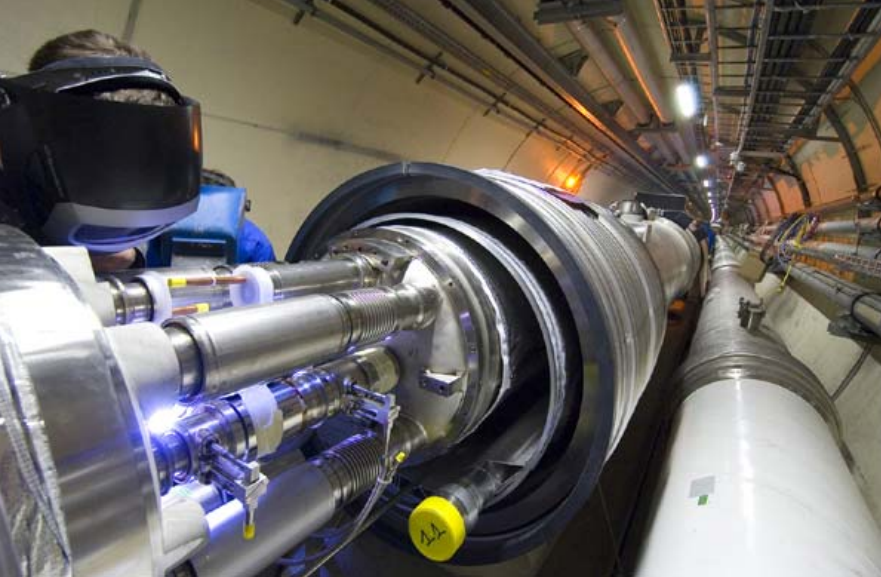
"New Experimental Constraints on Non-Newtonian Forces below 100 μm"

Chiaverini, J. et al. Physical Review Letters, 90, 1101, 2003

LHCでブラックホールが形成され、蒸発が観測されるかもしれない。

The Large Hadron Collider (LHC)



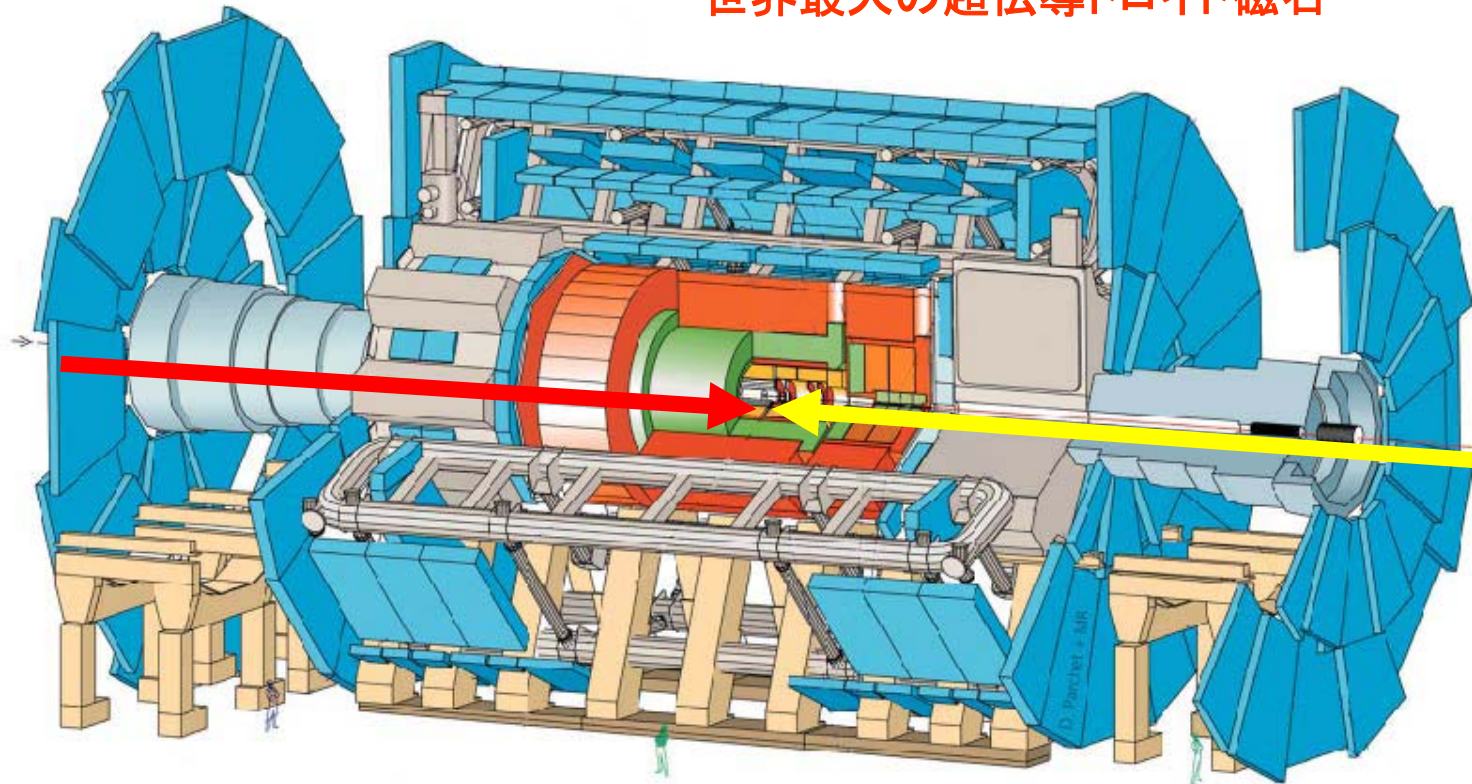


東大のグループも実験に参加している。

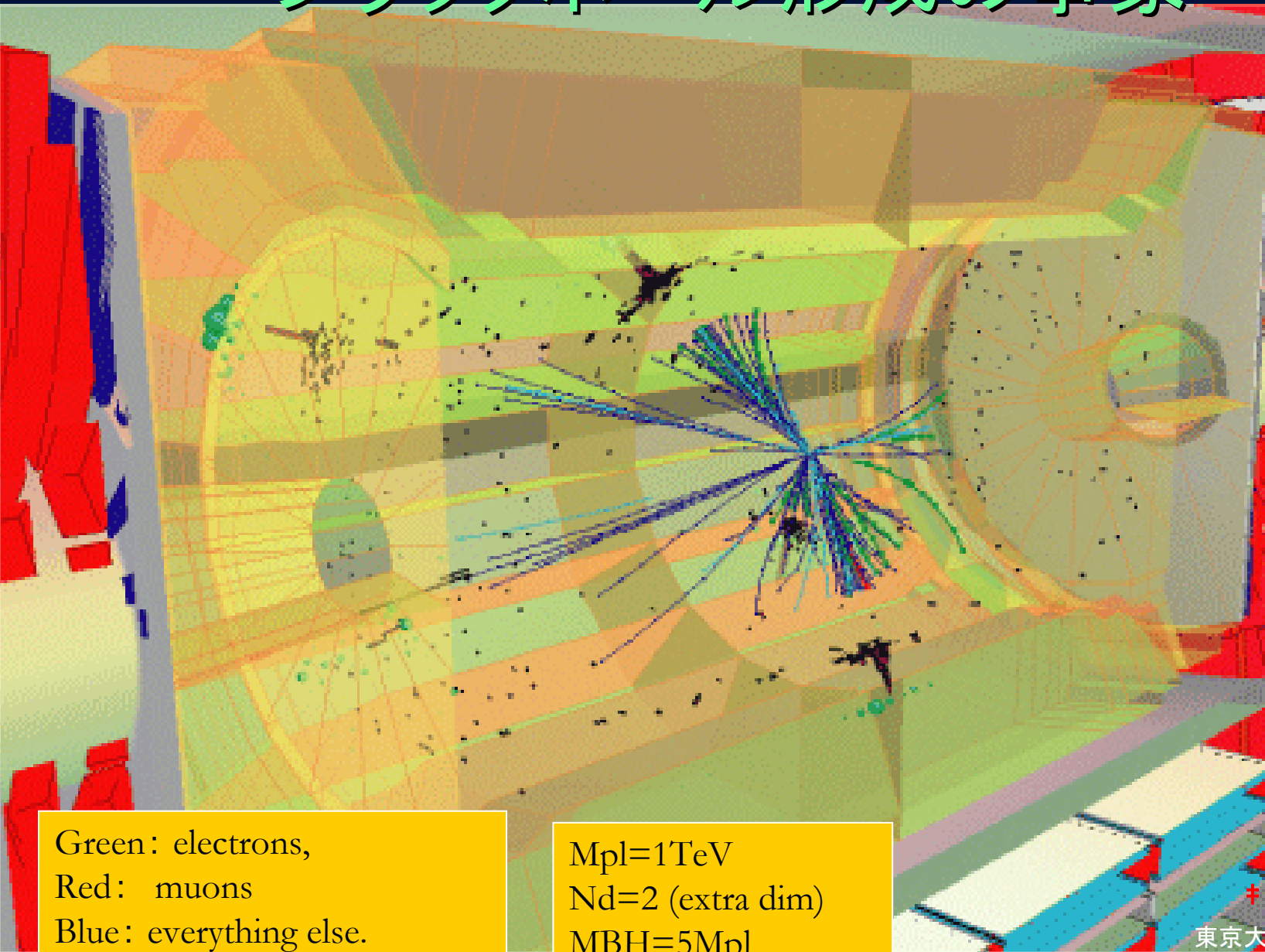
ATLAS測定器

- ・直径 22 m、長さ 44 m、重さ 7000 t
- ・世界最大の超伝導トロイド磁石

素粒子と素粒子を正面衝突させ、ブラックホールをつくる。



ブラックホール形成の事象



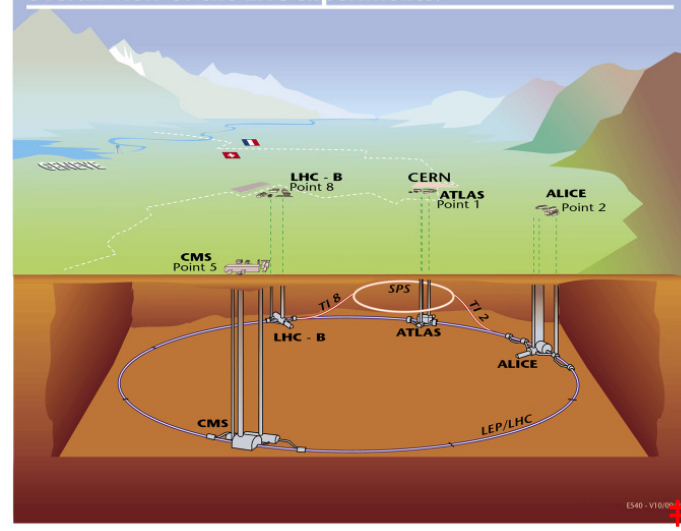
万物の理論は存在するのか？

- 物理学は森羅万象を記述できる単一の物理法則を求めてきた。超ひも理論がもっともそれに迫っていると考えているが、理論は多様。
- しかし、ほんとうに存在するのか？人間は限りなく迫ることはできて知っていることができるのか？



マトリョーシカ

Overall view of the LHC experiments.



CERN: <http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html>

2005 INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER WORKSHOP



LCWS 05

Stanford, California, USA 18-22 March, 2005



ILC Home Page <http://www.interactions.org/cms/>

万物の理論と基本定数

- 究極の法則があったとすれば、その中に 基本定数（パラメータ）は 幾つ含まれているのか？
- すべて時空や空間の対称性、幾何学量に帰し、基本定数はないのか？
- あるとすれば何が基本定数か？

時空の次元数？ プランク定数？、光速？

唯一に統合された力の強さ？

4つの力に分岐するエネルギーのスケール？

クォーク、レプトン、ニュートリノの質量？

- なぜそのような値なのか？

例： 電磁気力の強さ
微細構造定数：

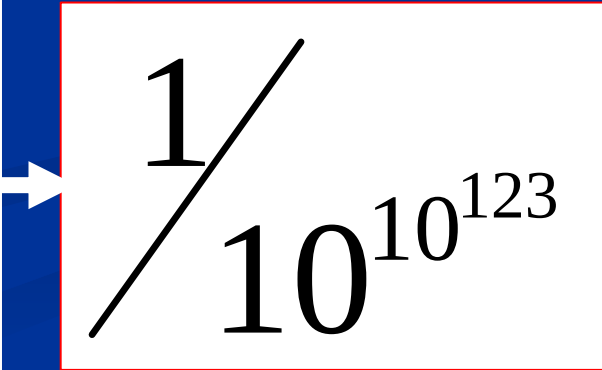
$$\alpha \equiv \frac{e^2}{\hbar c} = 1/137.035989561 \Lambda$$

人間原理という考え方

- 現在の宇宙の法則、物理定数は我々、人類が生まれるようにデザインされている。少しでも、電磁気力、強い力、・・の強さが異なると人間(生命)は生まれない。
- 認識主体(知的生命体;人間)が生まれる宇宙のみ存在が認識される。他の宇宙は認識されない。

神が我々の住んでいる宇宙と同じような宇宙を作り出すためには、途方もなく小さな位相空間の小さな体積をねらう必要がある。

「心は量子で語れるかー21世紀物理の進むべき道をさぐるー」
ロジャー・ペンロウズ著 中村和幸訳 講談社 1999 より


$$\frac{1}{10^{10^{123}}}$$

物理定数は人間が宇宙に生まれるよう
デザインされているのか？

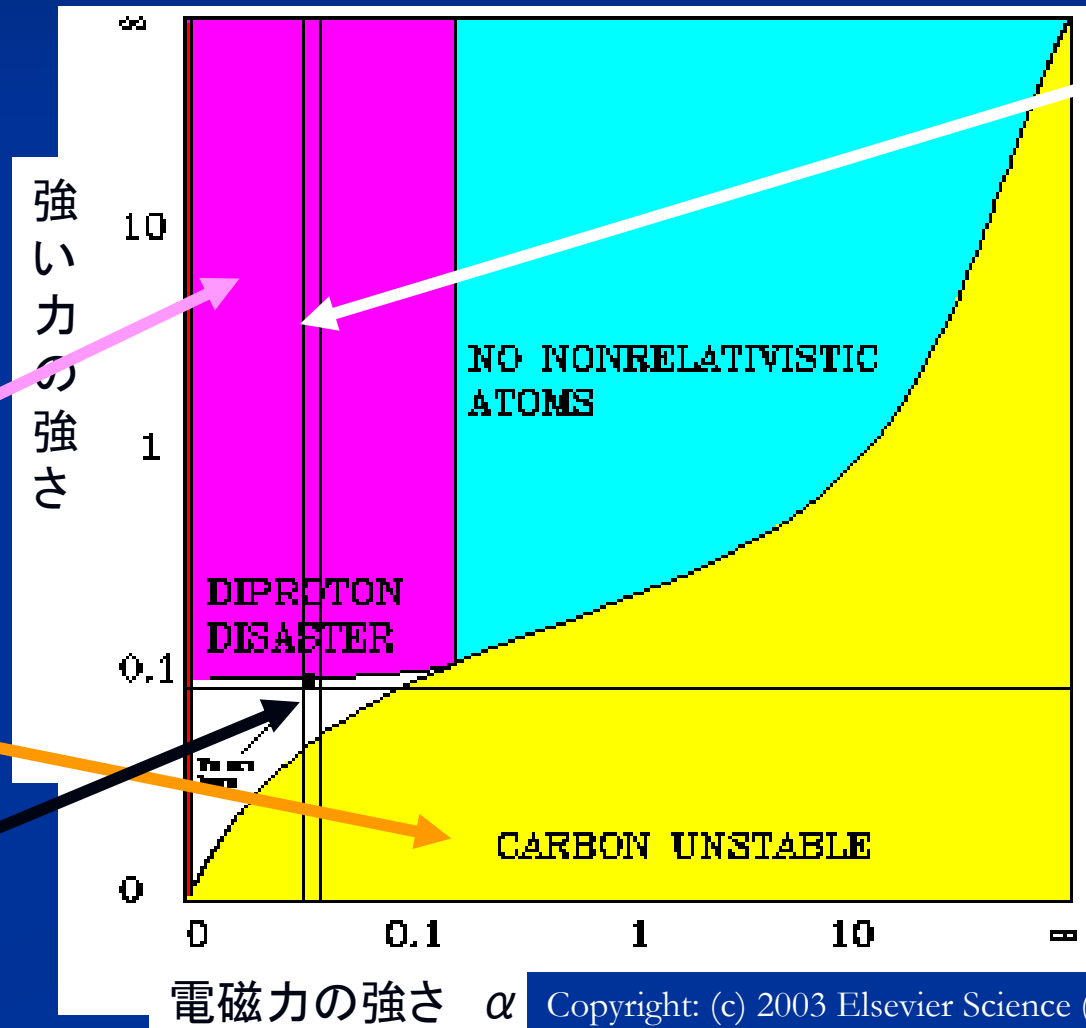
Tegmark, gr-qc/9704009

空間の次元

次元が3より多いと、電子は核に、惑星は太陽に落下。

- ヘリウム2が存在可能。ビッグバンでは水素残らない。
- 安定な元素なし。炭素なし。

現在の値



大統一理論の結合定数から

なぜ物理法則は美しいのか？

■ 単純な原理、対称性、数学的整合性 から物質世界の構造、法則が導かれる。

- ・現実世界は、 (n, p, e) 、クォーク・レプトンの対称性など
- ・最小作用の原理により運動法則は導かれる。

例) アインシュタインの一般相対論の美しさ:

1) 一般相対原理

(物理法則はどんな座標系を採ろうとも同じ形式に書くことができる。)

2) 等価原理 (重力と加速度運動の等価性)

という単純な原理から、時間空間の美しい物理法則が得られる。

美とは何か？

■ 進化心理学：我々の心も進化の産物。

私たちは自らの生命を維持し子孫を残すことに寄与する現象、また行為に快感を感じ、反対のものには不快感を感じるように、自然選択の過程で遺伝子に書き込まれている。

例： みずみずしい緑あふれる自然、澄みわたった青空、星の瞬く空(環境の良さ)、
対称な構造（安定性）、、、、 整った顔(健康)、、、、など。

人間が生存するために役立つ自然の法則を見つけたとき、それを美しく感じ、快感を覚えるように、自然選択の過程で遺伝子に書き込まれた？

美は真、真は美

Beauty is truth, truth is beauty. John Keats (1795-1821)

美は必ずしも真ではないが、
美の中に真はある。

注意

私たちの脳は、世界に関する知見を体系化、整理するように、巧みにデザインされている。しかし、その必然的な派生物として、なんら規則性のない現象の中にも、無理やり外捜し、規則性やパターンを発見してしまう。

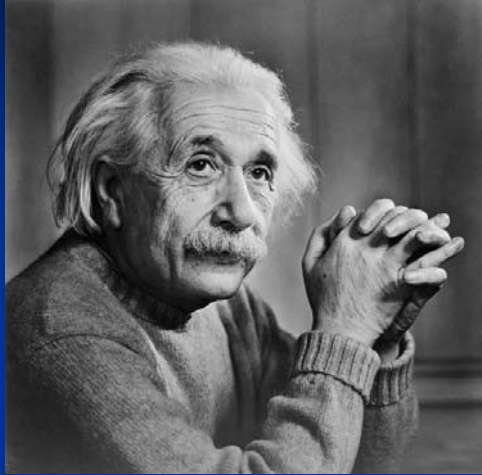
莊子の言葉



原天地美、
達万物理

莊子

アインシュタインの言葉



学ぶこと、つまり真理の
探究は我々が生涯子供の
ままでいることを許して
くれる分野だ。