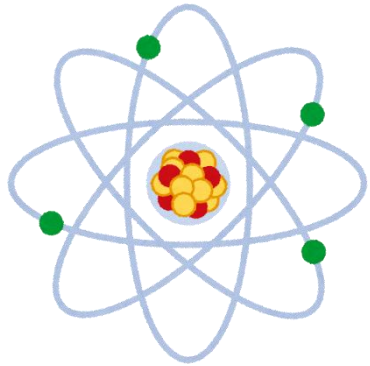
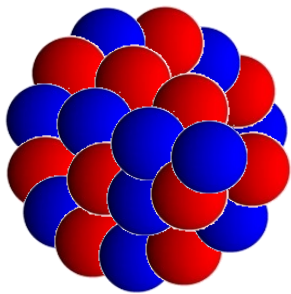


原子核がつなぐ素粒子と宇宙 ～有限量子多体系の魅力～



萩野浩一

物理学・宇宙物理学専攻 教授
物理第二分野 原子核理論研究室



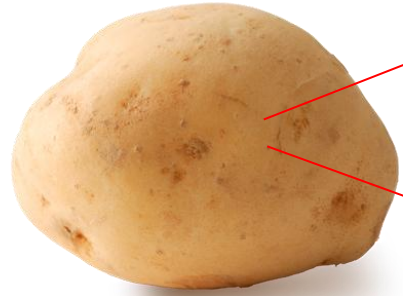
1. 原子核とは何か?
2. 湯川秀樹について
3. 究極の理論: 量子色力学 (QCD)
4. 宇宙における元素合成の謎
5. まとめ



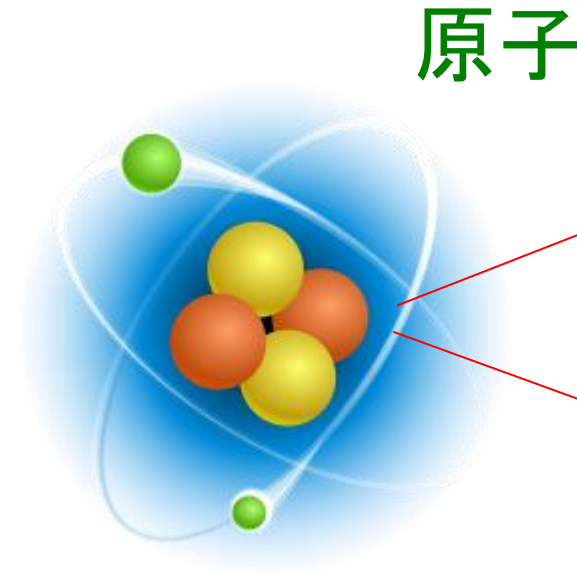
原子核って何？

すべての「もの」は原子からできている

原子核は原子の「核」

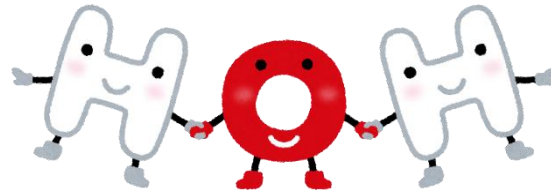
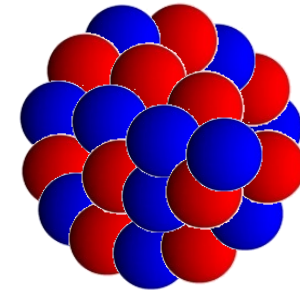


10億倍

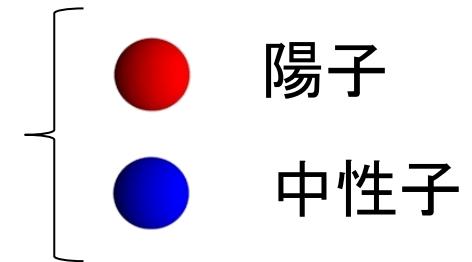


10万倍

原子核



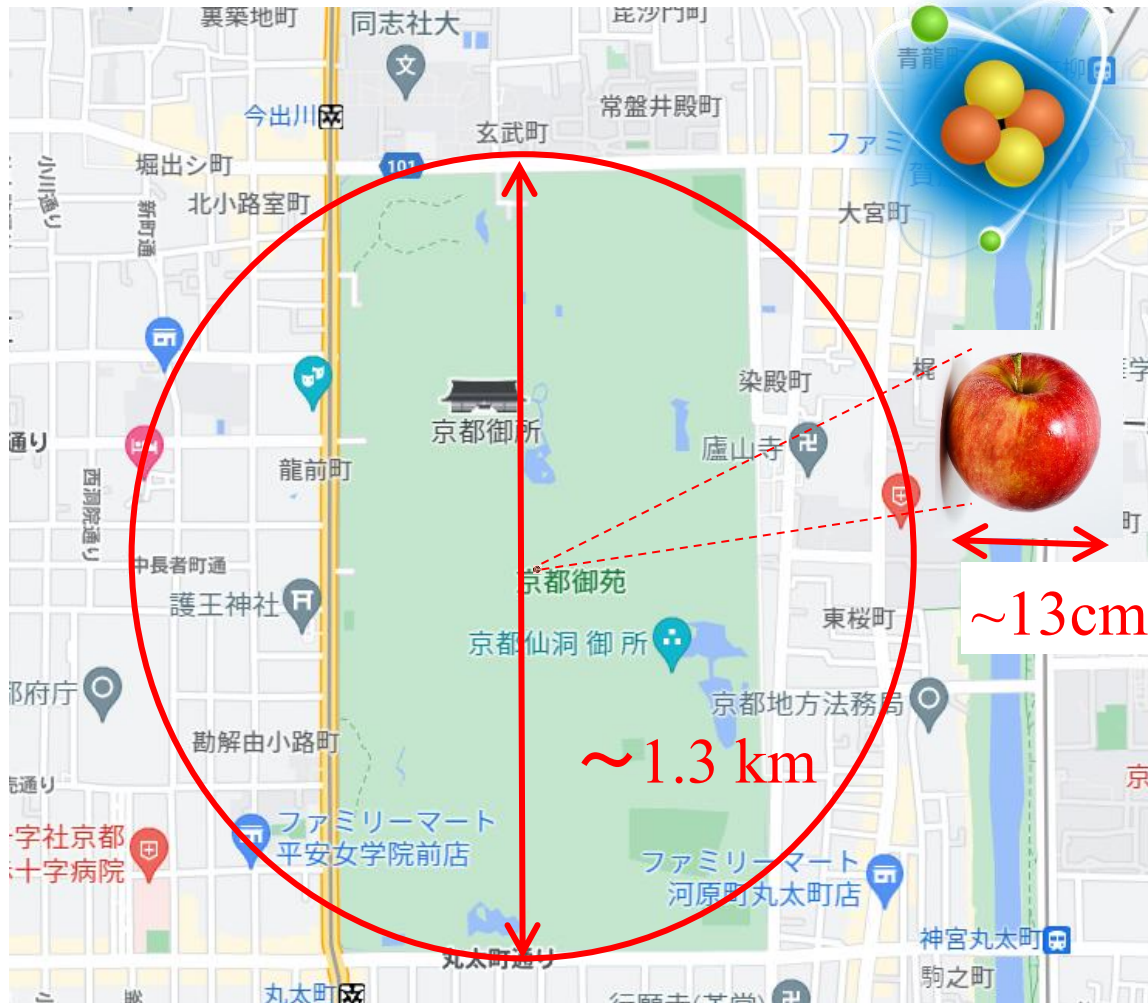
水も H₂O



の2種類の粒子から出来ています

原子核って何？

原子核の大きさはどのくらい？



原子核は原子の約10万分の1の大きさ



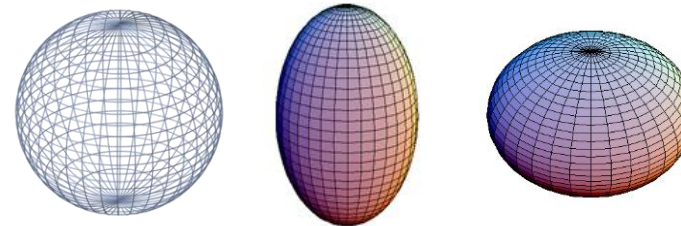
湯川秀樹 博士

どうして陽子や中性子を
こんな小さいところに
閉じ込めておけるのか？



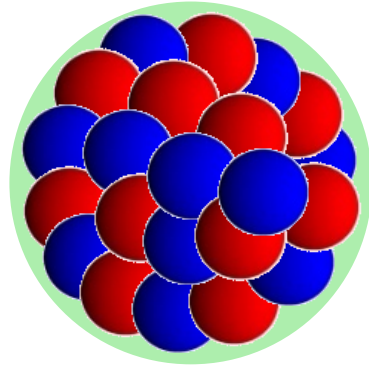
小さくても面白い原子核

いろいろな形



原子核の形について

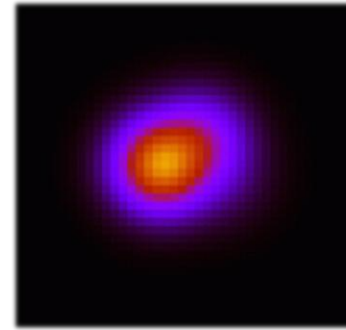
原子核の古典的なイメージ:



丸いボール

実際、原子核を古典的な液滴だと思いと丸い形が一番エネルギー的に安定
←原子核物理学が始まった当初の考え

実際には: 原子核は「量子液体」



${}^6\text{He}$ ($E^*=10$ MeV)

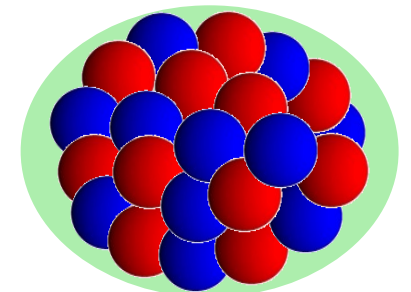
time-dependent AMD

R. Imai et al., PRC99, 064327 (2019)

- ✓ 核子は原子核の中でじっとしているわけではない (比較的自由に動きまわっている)
- ✓ ただし、完全に自由というわけではない
(お互いに飛び出すことのないように引っ張りあいながら一定の形を保っている)

自己束縛系 → 比較的容易に形を変えることができる

中心に原子核があって電子の位置が「固定されている」
がある原子とは大きく異なる



原子核って何？

原子核の大きさはどのくらい？



原子核は原子の約10万分の1の大きさ



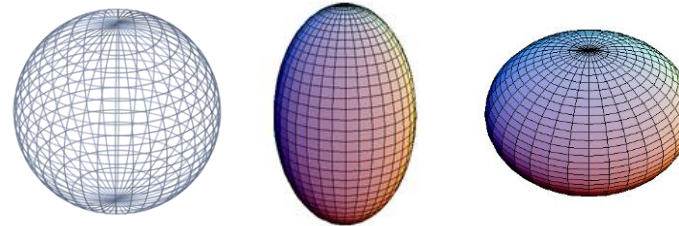
湯川秀樹 博士

どうして陽子や中性子を
こんな小さいところに
閉じ込めておけるのか？

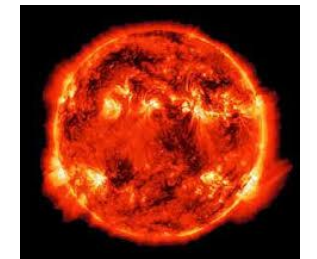


小さくても面白い原子核

いろいろな形



核融合反応



星が光ってるわけ

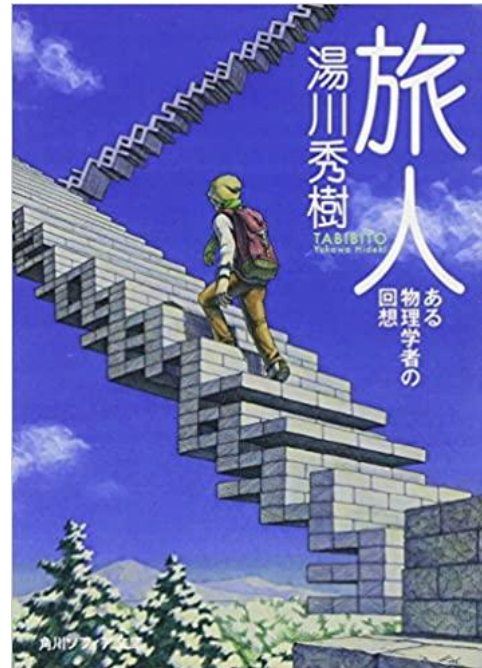
湯川秀樹博士



Wikipedia

- 明治40年(1907年)生まれ
- 昭和56年(1981年)没
- 京都帝国大学理学部物理学科卒業

日本で初めてのノーベル賞(物理学賞)を受賞



「旅人」
湯川秀樹の自伝

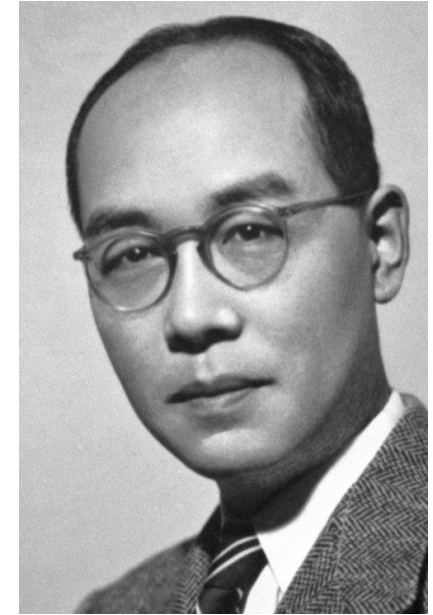
湯川秀樹博士のことば

「私の中にあって、何十年にもわたって、私を動かし続けているのは、

未知の世界へのあこがれ

である。私にとって、それは美しい世界であると期待されている。」

湯川秀樹 「自己発見」より



Wikipedia

「未知の世界を探求する人々は、

地図を持たない旅行者である。地図は探求の結果として、できるのである。」

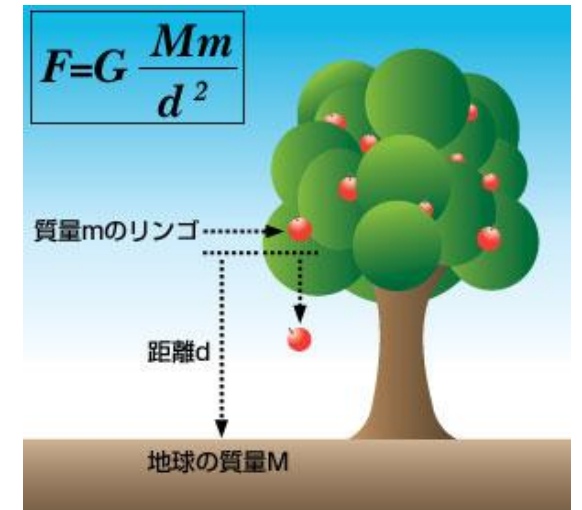
湯川秀樹 「旅人」より

湯川秀樹博士はどのような「未知の世界」を探求したのか

湯川秀樹は何をした人なのか？

4つの力

- 重力(万有引力)
- 電磁気力(電気や磁石の力)
- 強い力(原子核の力)
- 弱い力(ニュートリノが関係する力)



JAXAのページより

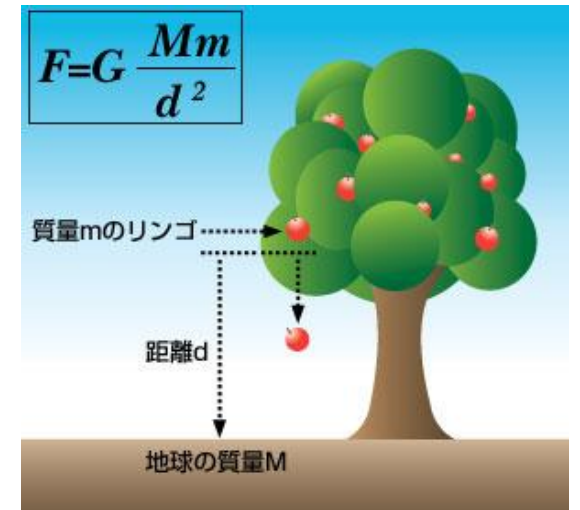


Wikipedia

湯川秀樹は何をした人なのか？

4つの力

- 重力(万有引力)
- 電磁気力(電気や磁石の力)
- ➔ • **強い力(原子核の力)**
- 弱い力(ニュートリノが関係する力)



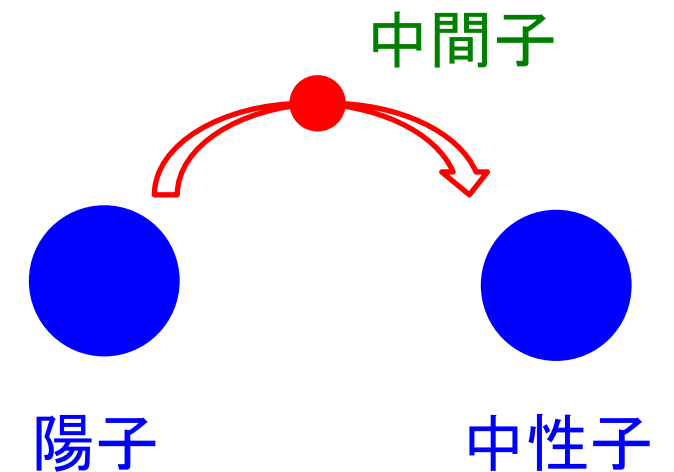
JAXAのページより



Wikipedia

□ 「強い力」を解明し、「中間子論」を提唱。
(1935年 昭和10年)

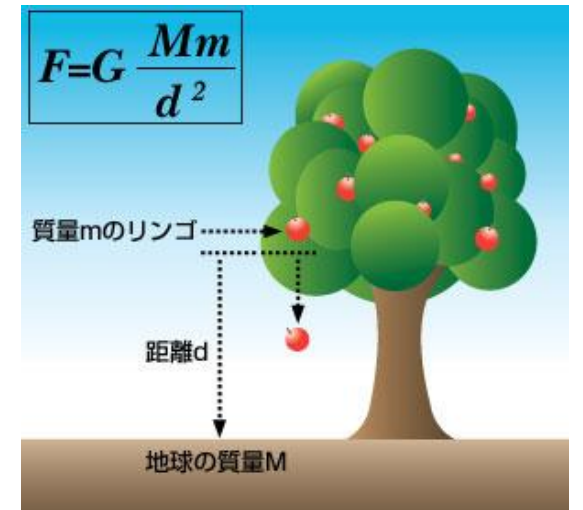
□ 1949年日本初のノーベル賞受賞



湯川秀樹は何をした人なのか？

4つの力

- 重力(万有引力) ニュートン
- 電磁気力(電気や磁石の力) マクスウェル
- ➔ • **強い力(原子核の力)** 湯川
- 弱い力(ニュートリノが関係する力) フェルミ、パウリ



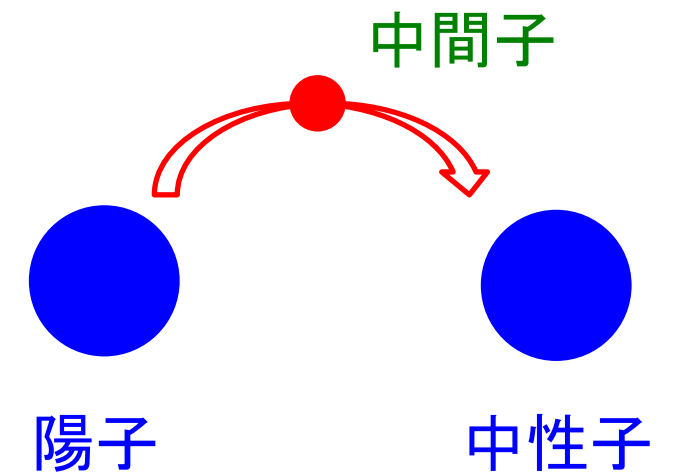
JAXAのページより



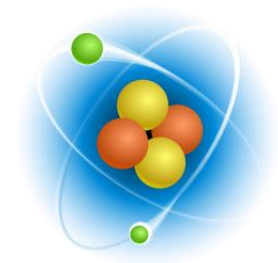
Wikipedia

□ 「強い力」を解明し、「中間子論」を提唱。
(1935年 昭和10年)

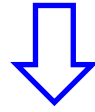
□ 1949年日本初のノーベル賞受賞



「元素」の正体は「原子」



「原子」にも中身がある: 電子と原子核 (1911年)



原子核がなぜ存在しているのかというのが謎だった
(当時はまだ重力と電磁気力しか分かっていなかった)。

湯川秀樹博士はこれを解明(1935年)。



素粒子
物理学

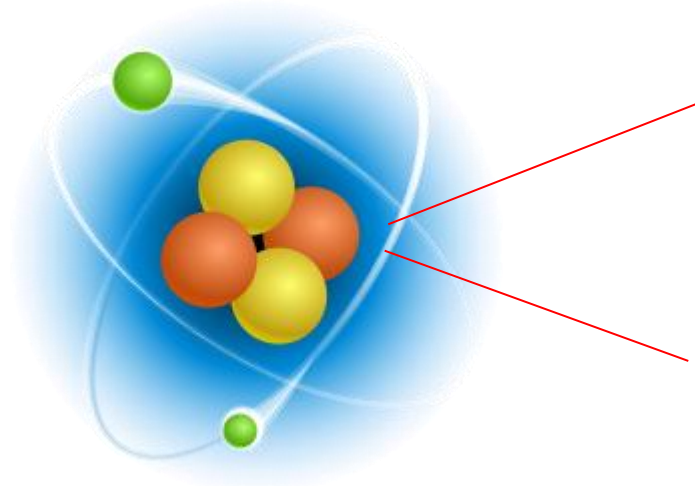
原子核
物理学

今日はこちら側の話

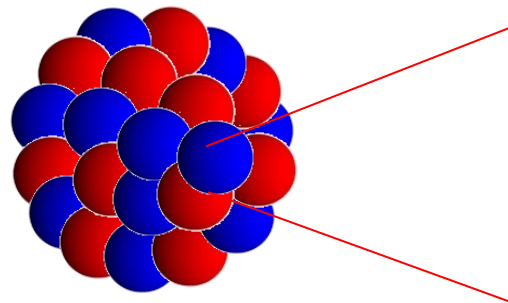
- 元素
- 原子核
- ハドロン

湯川秀樹博士は素粒子物理学・原子核物理学を開拓した人

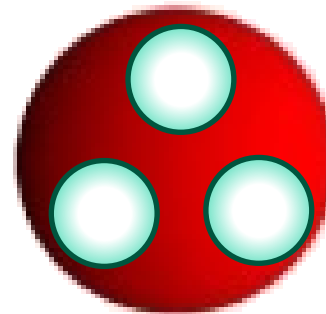
原子



原子核



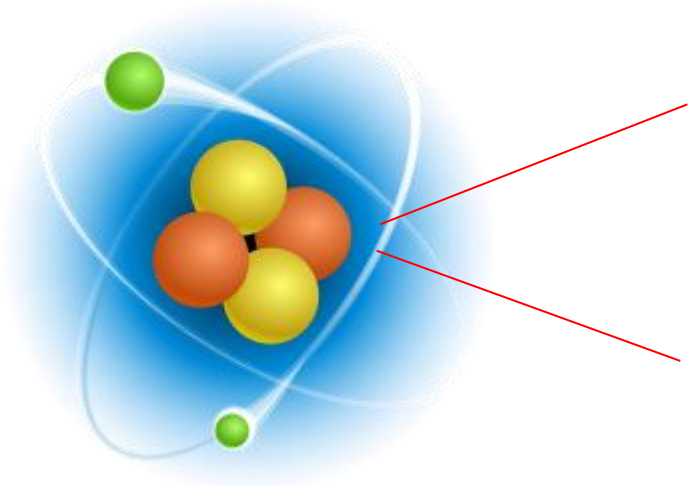
核子(陽子、中性子)



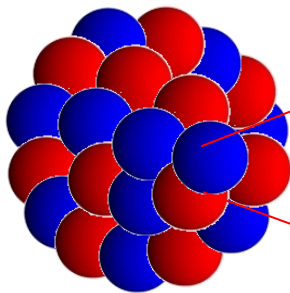
クォーク
グルーオン

- ✓ クォークは核子の中に閉じ込められている
- ✓ クォークは $2/3e$ や $-1/3e$ のような電荷を持っている

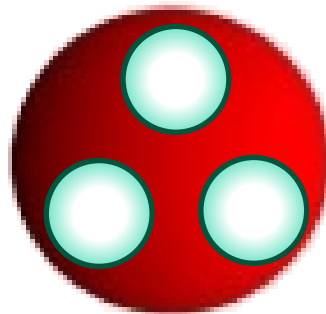
原子



原子核



核子(陽子、中性子)



クォーク
グルーオン

クォークやグルーオンのダイナミクス: 量子色力学 (Quantum Chromo Dynamics: QCD)

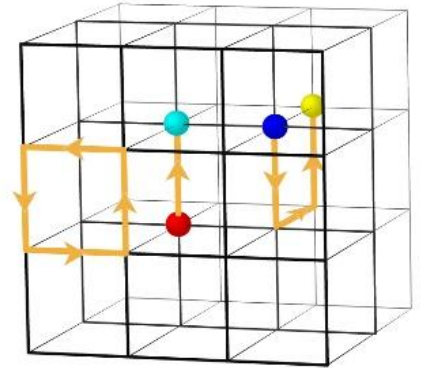
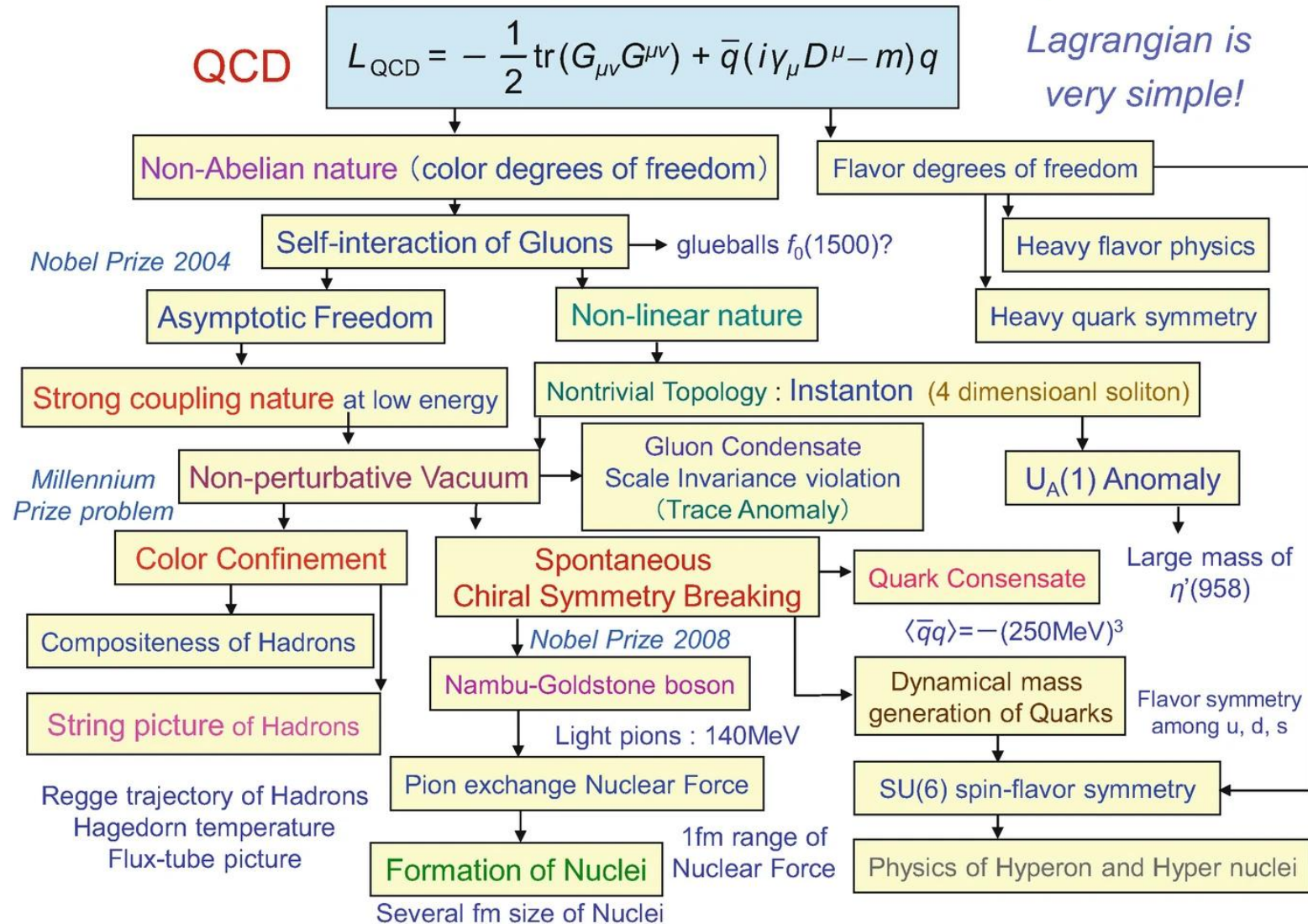
$$\mathcal{L} = \sum_q \bar{q}(\gamma^\mu i D_\mu - m_q)q - \frac{1}{2} \text{Tr} G_{\mu\nu} G^{\mu\nu}$$

たった1行のラグランジアンで、陽子の内部構造 ($\sim 10^{-16}$ m) から中性子星 (~ 10 km) まで20桁以上のスケールの違う物理現象をすべて説明できる。 **スゴイ!**

たった1本のラグランジアンから強い相互作用が関わるありとあらゆる物理が創生される

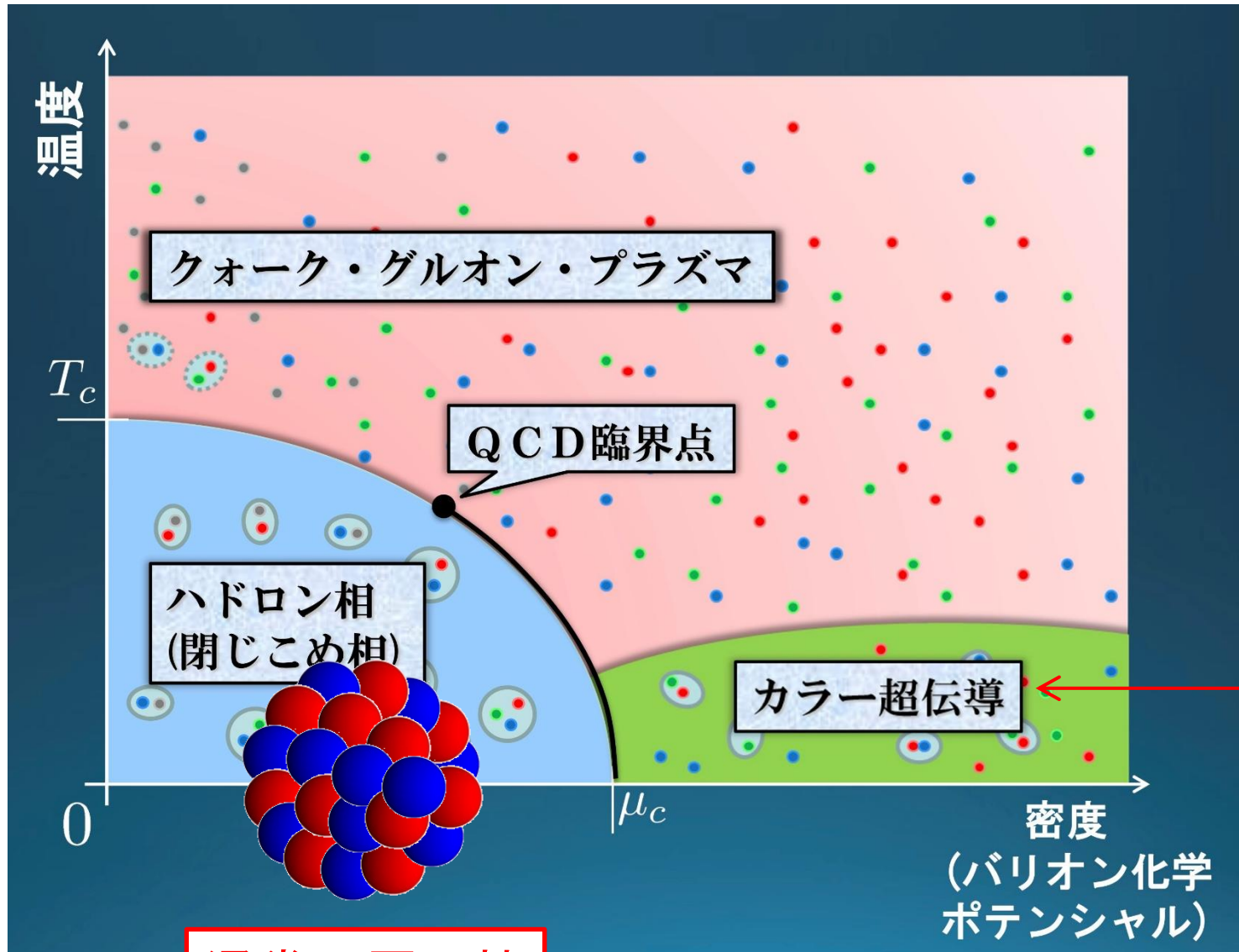
究極の理論

QCD: various physical phenomena at microscopic scale

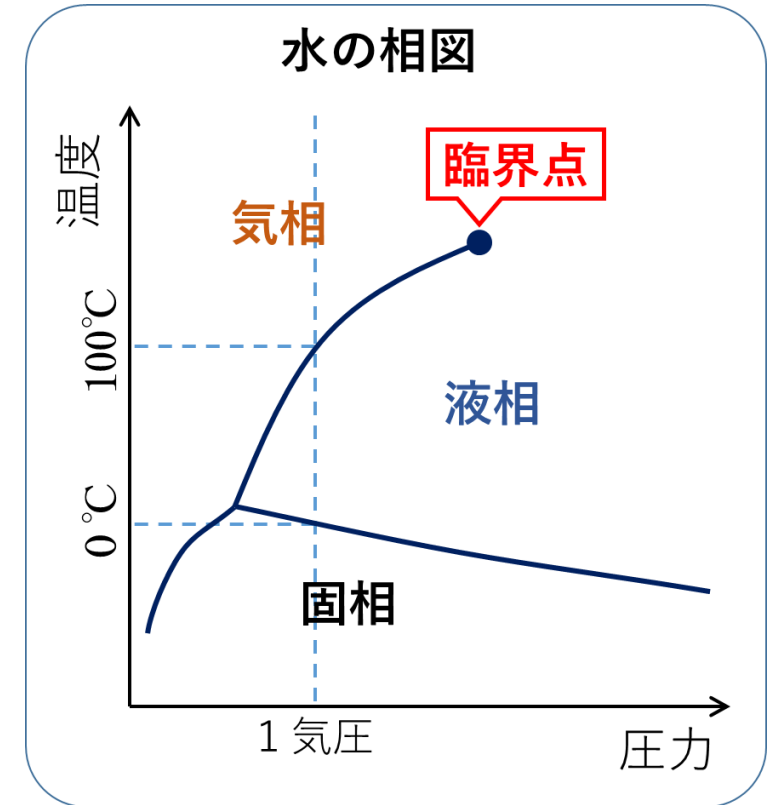


もちろん、実際に解くのは相当難しい cf. 格子QCD

クォークでできた物質の相図(QCD相図)



通常原子核



クォークが超伝導状態になっている！

スライド: 北沢正清氏 (京大基研)

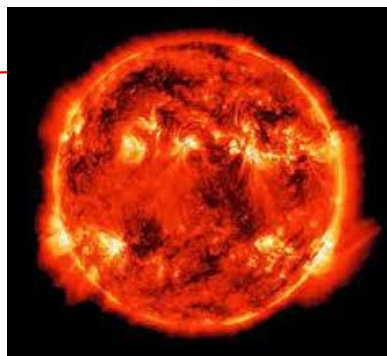
宇宙における物質の生成と進化のメカニズムを解明する！



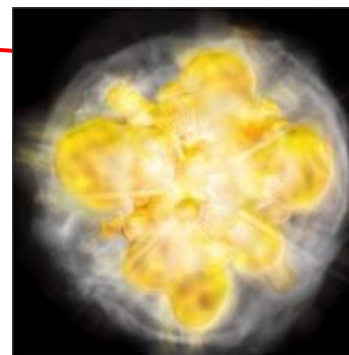
ビッグバン



星間ガス



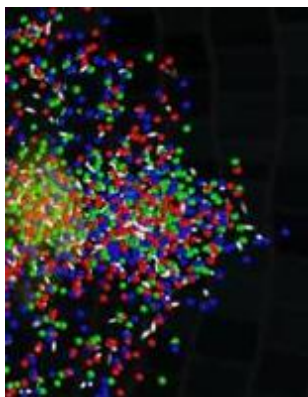
恒星



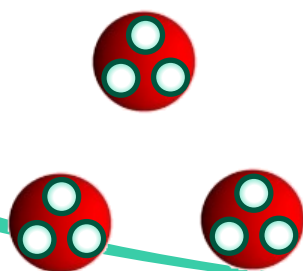
超新星爆発



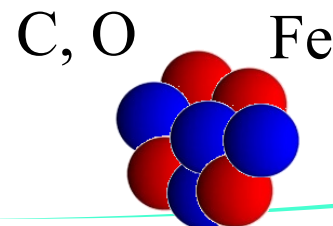
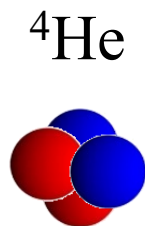
中性子星



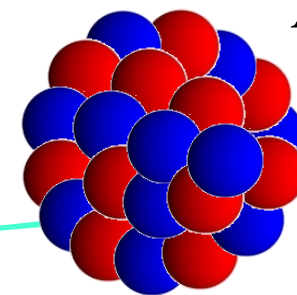
素粒子
(クォーク)



ハドロン
(核子)



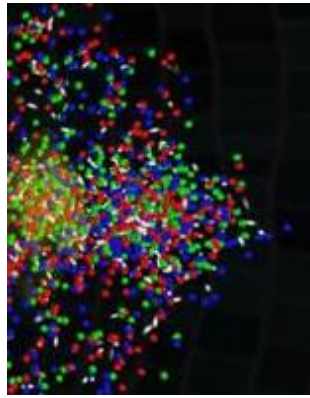
原子核



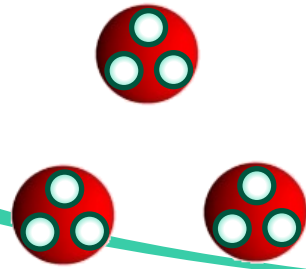
超高密度物質



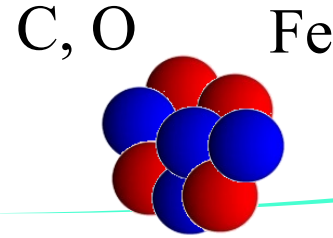
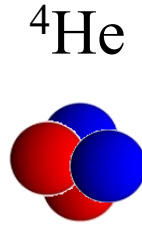
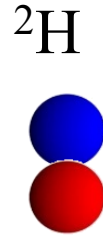
宇宙における物質の生成と進化のメカニズムを解明する！



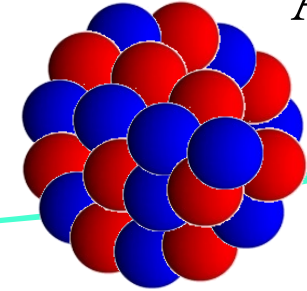
素粒子
(クォーク)



ハドロン
(核子)



原子核



Au, U



超高密度物質

ハドロン形成の謎

クォークはなぜ
閉じ込められる？
ハドロンはどのように
質量を獲得した？

核力の謎

なぜ原子核は
存在するのか？
魔法数はどう理解
できるか？

元素合成の謎

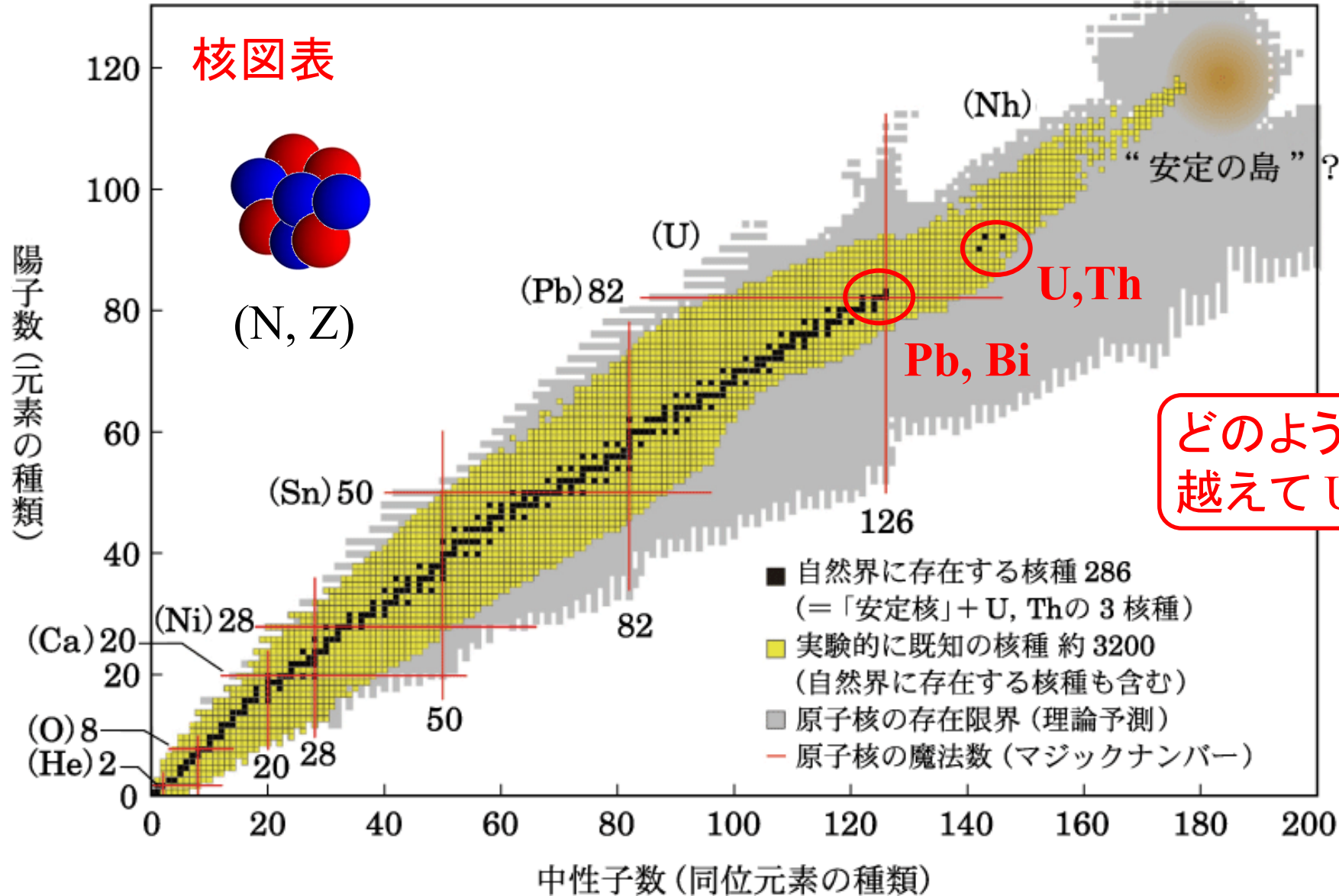
様々な元素は宇宙
の中でどうやって
できたか？

中性子星の謎

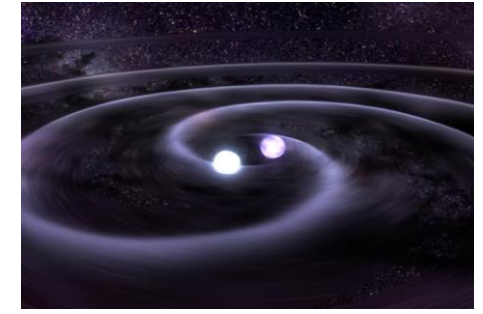
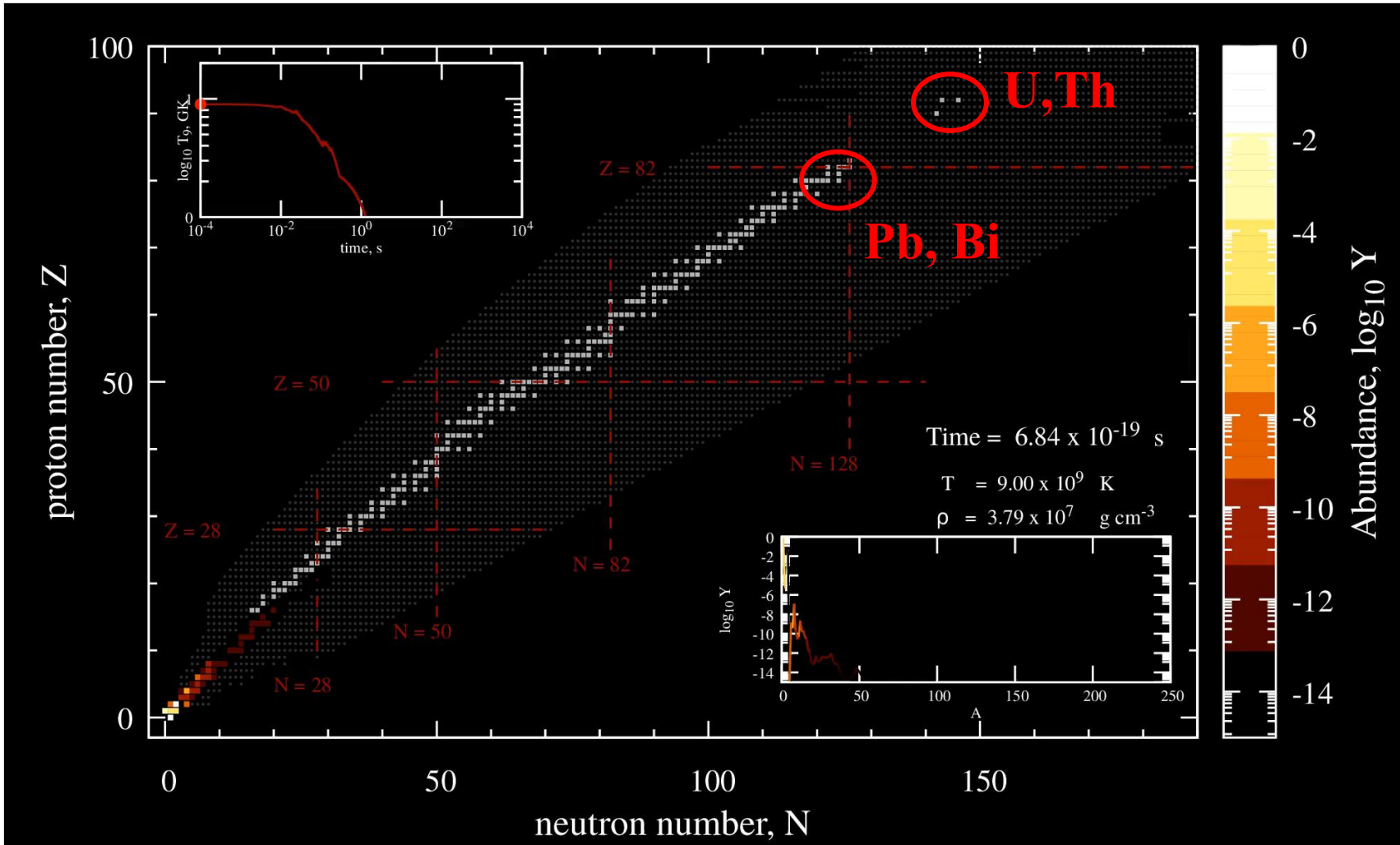
内部はどのような
物質になっている
のか？

QCDから世の中のすべてを明らかにしたい～素粒子から宇宙まで～

例として: 元素合成の謎



r プロセス元素合成



中性子星の合体のときなどに、中性子を急速に吸収してギャップを超える

分かっていないことも多い
← 中性子過剰核の性質

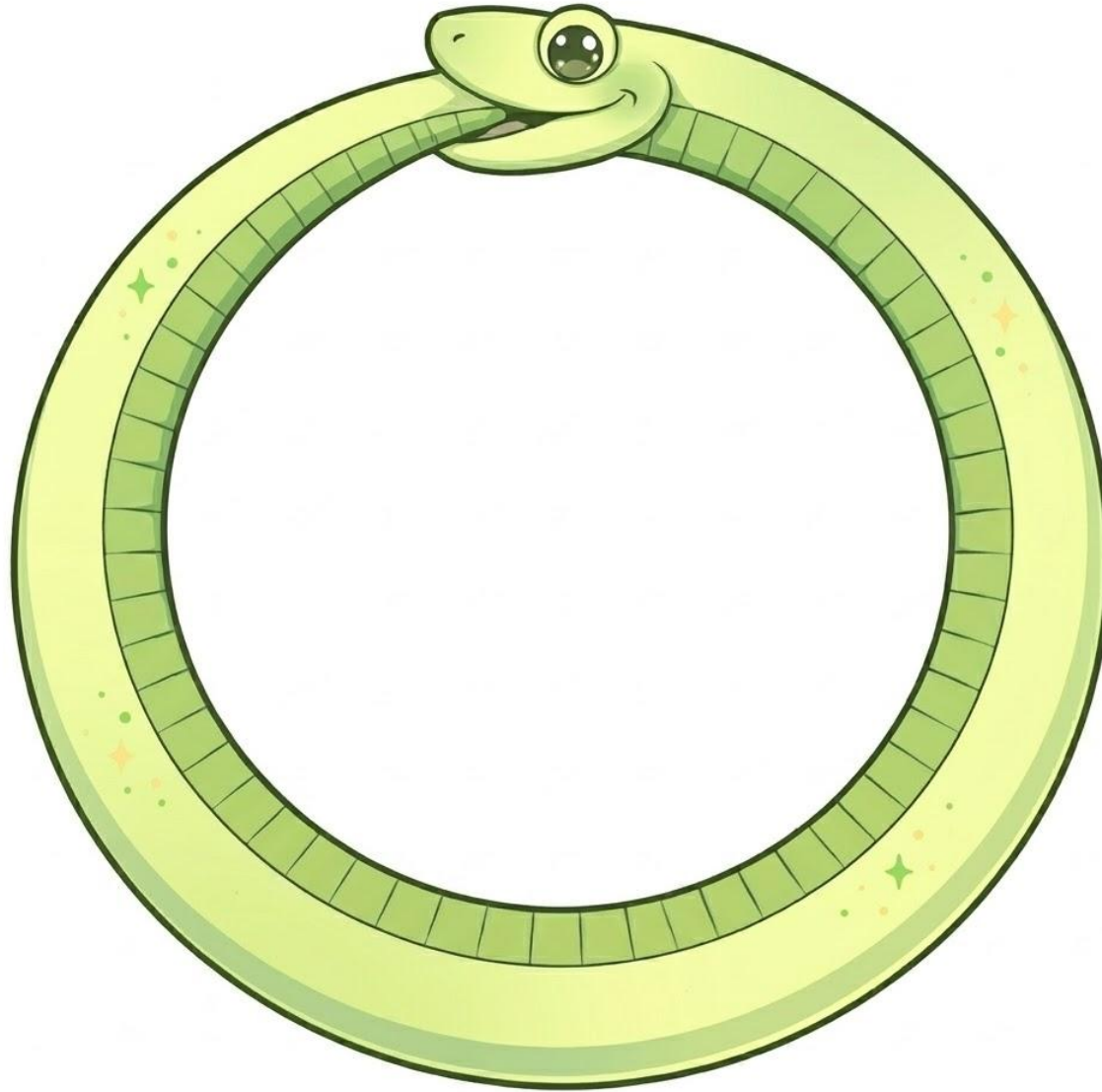


実は、金の起源はよくわかっていない

動画: 西村信哉氏(工学院大)

まとめ

ウロボロスの蛇

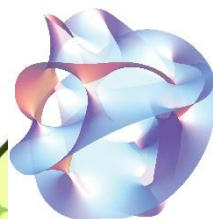


古代のシンボルの1つで、
永遠、無限、循環
などを意味する。

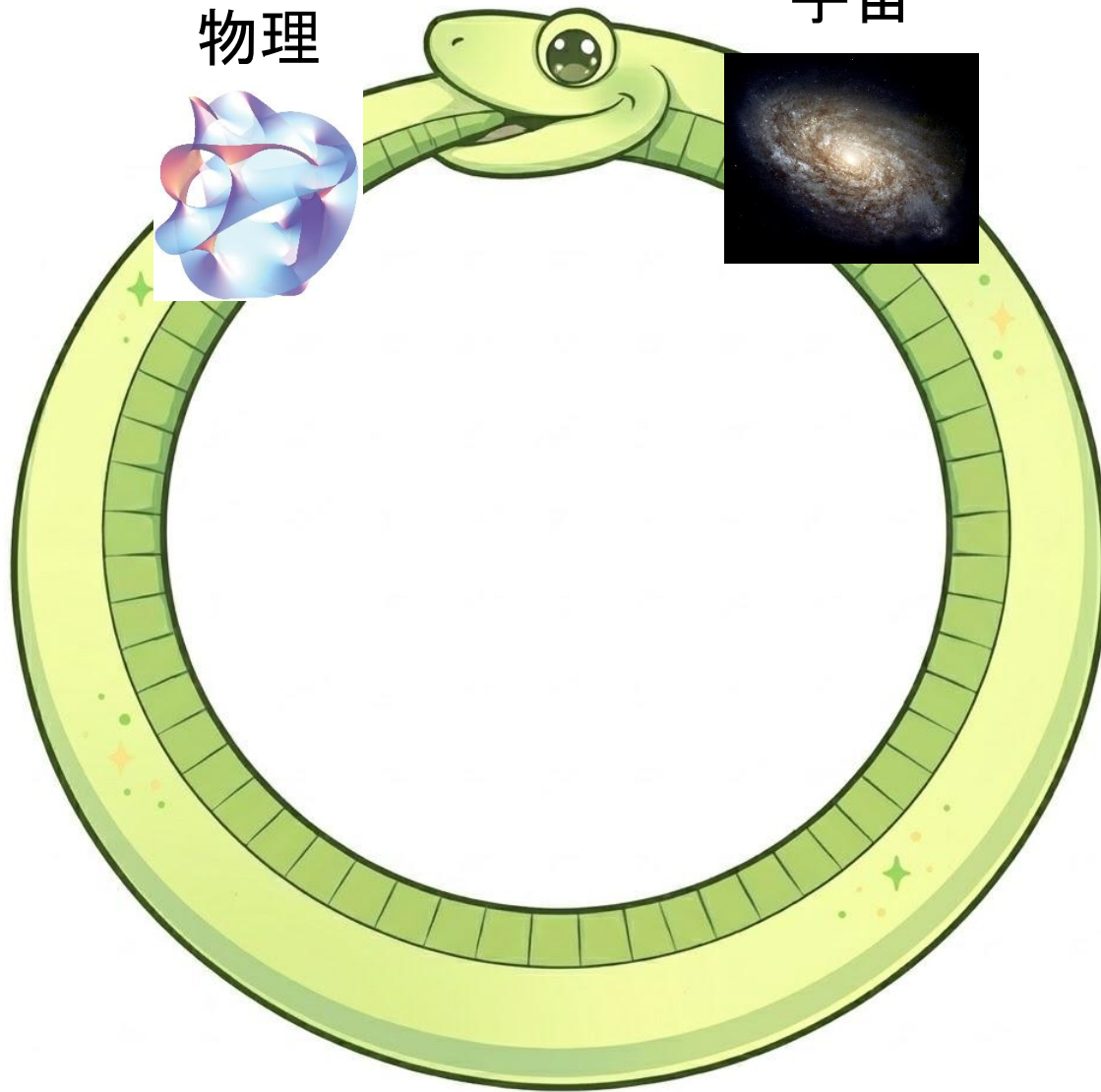
まとめ

ウロボロスの蛇

素粒子
物理



宇宙



大きいスケール(宇宙)と
小さいスケール(素粒子)
がつながっている。

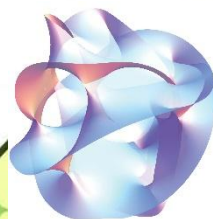
まとめ

ウロボロスの蛇

原子核がつなぐ素粒子と宇宙

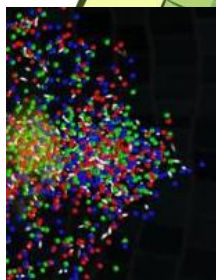
素粒子
物理

宇宙



恒星
中性子星

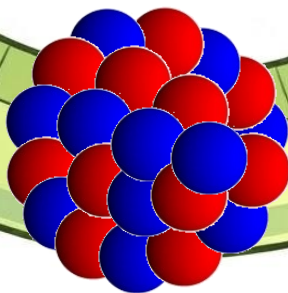
クォーク
グルーオン



量子色力学(QCD)

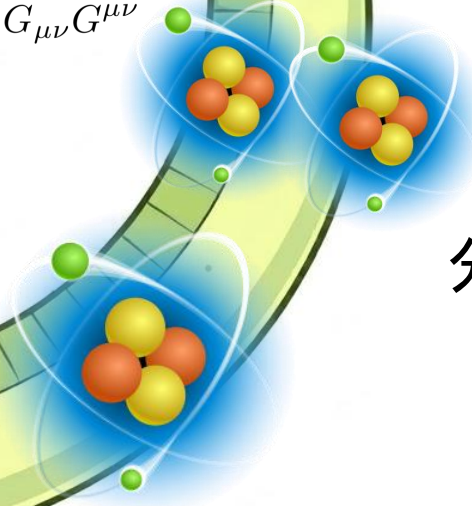
$$\mathcal{L} = \sum_q \bar{q}(\gamma^\mu iD_\mu - m_q)q - \frac{1}{2} \text{Tr} G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$$

ハドロン
(核子)



原子核

分子



原子

→量子多体論:物性物理学