

平成19年6月20日
国立大学法人筑波大学
国立大学法人東京大学

原子核の中にある“強い力”の起源を解明 -- 格子ゲージ理論とスーパーコンピュータが拓く物質研究 --

○ ポイント

このたび、国立大学法人筑波大学【学長 岩崎洋一】（以下「筑波大学」という。）と国立大学法人東京大学【総長 小宮山宏】（以下「東京大学」という。）の研究チームは、格子ゲージ理論^{*4}と呼ばれる手法に基づき、高エネルギー加速器研究機構の高速スーパーコンピュータ「ブルージーン」^{*5}を用いた大規模数値シミュレーションを行うことで、原子核の中にある“強い力”（核力）の起源を量子色力学^{*3}から解明することに世界で初めて成功しました。研究の結果、湯川秀樹博士^{*1}の中間子理論がクォーク^{*2}を基礎に検証されただけでなく、原子核の安定性や中性子星^{*6}の構造の理解の鍵となる、核力の強い斥力芯も理論的に導かれました。

この研究は、クォークに基づく物質研究という新しい分野を開くとともに、茨城県東海村に建設中の大強度陽子加速器施設 J-PARC^{*7}におけるハイパー原子核^{*8}生成実験の理論的支柱を与えることにもなります。

この研究成果は、米国物理学会のフィジカル・レビュー・レター誌2007年6月号及び on-line 版に掲載されます。

○ 概 要

70 年以上も前、湯川秀樹博士^{*1} は陽子や中性子を原子核に束縛する“強い力”（核力）を説明するため、未知の粒子である湯川中間子を導入しました。その後、陽子・中性子・中間子などは、クォーク^{*2} と呼ばれる素粒子からできている事が実験的に判明しました。しかし、クォークの基礎理論である量子色力学^{*3} の複雑さのために、核力の起源をクォークから解明することは極めて困難な状況にありました。

筑波大学大学院数理物質科学研究科の青木慎也教授と計算科学研究センターの石井理修研究員、東京大学大学院理学系研究科の初田哲男教授の研究グループは共同で、格子ゲージ理論^{*4} と呼ばれる手法に基づき、高エネルギー加速器研究機構の高速スーパーコンピュータ「ブルージーン」^{*5} を用いた大規模数値シミュレーションを行うことで、核力の起源を量子色力学から解明することに世界で初めて成功しました。湯川秀樹博士^{*1} の中間子理論がクォーク^{*2} を基礎に検証されただけでなく、原子核の安定性や中性子星^{*6} の構造の理解の鍵となる、核力の強い斥力芯が理論的に導かれました。この研究は、クォークに基づく物質研究という新しい分野を開くとともに、茨城県東海村に建設中の大強度陽子加速器施設 J-PARC^{*7} におけるハイパー原子核^{*8} 生成実験の理論的支柱を与えることにもなります。この研究成果は、米国物理学会のフィジカル・レビュー・レター誌の2007年6月号に掲載されます。

○ 発表内容

背景

湯川秀樹博士（1949年ノーベル物理学賞受賞、今年が生誕100年にあたる）は、正電荷を持つ陽子や電荷を持たない中性子を原子核内に束縛する“強い力”（核力）が、湯川中間子の交換で理論的に説明できるとする中間子論を提唱しました。このアイデアは、電子のような電荷を持つ粒子の間に働く力が、光子の交換として理解できることをヒントに着想されたものです。その後の実験により、核力は遠距離では引力ですが、至近距離では強い斥力になることが分かってきました。これを核力の斥力芯と呼びます。この斥力芯のおかげで、陽子や中性子が近づきすぎず、原子核は比較的低密度に保たれています。また、太陽質量の1～2倍の重さを持つ中性子星が、自己重力で崩壊してしまわないのも斥力芯のおかげです。さらに、大質量星が引き起こすII型超新星爆発において、その爆発の起爆原因となるのも斥力芯であると考えられています。

さて、湯川博士以来の素粒子物理学の発展により、陽子や中性子は3つのクォークの束縛状態であることが分かりました。従って、陽子や中性子が互いに重なりあうような至近距離での核力を理解するには、クォークを支配する理論である量子色力学を使わなければなりません。量子色力学は、クォークとゲージ粒子であるグルーオンを基本とする理論ですが、グルーオン同士が複雑な相互作用をするため、単独の陽子や中性子の質量の計算でさえ容易に行うことはできません。したがって、陽子や中性子の間に働く

強い力、なかでも斥力芯を量子色力学から理論的に導出することは、素粒子・原子核物理学における大きな未解決問題の一つでした。

格子ゲージ理論と高速スーパーコンピュータ

量子色力学の複雑な計算を可能にする方法としてケン・ウィルソン博士（1982年ノーベル物理学賞受賞）により提唱されたのが、格子ゲージ理論です。これは量子色力学を連続的な4次元時空間ではなく、離散的な4次元格子空間で構築するもので、コンピュータを使った大規模数値シミュレーションに適しています。近年、陽子や中性子の質量の精密計算が、このような手法で可能になりました。日本はアメリカやヨーロッパとならぶ格子ゲージ理論研究の世界的中心であり、特に今回の研究チームの2名（青木、石井）が関係する筑波大学計算科学研究センターは、多くの世界的研究成果を挙げています。

今回、筑波大学と東京大学の研究チームは、この格子ゲージ理論を核力の問題に適用し、大規模数値シミュレーションによってその構造を理解することに取り組みました。幸い、必要とされる膨大な計算は、昨年3月に高エネルギー加速器研究機構に導入された最新の高速スーパーコンピュータ「ブルージーン」を用いることで可能になりました。

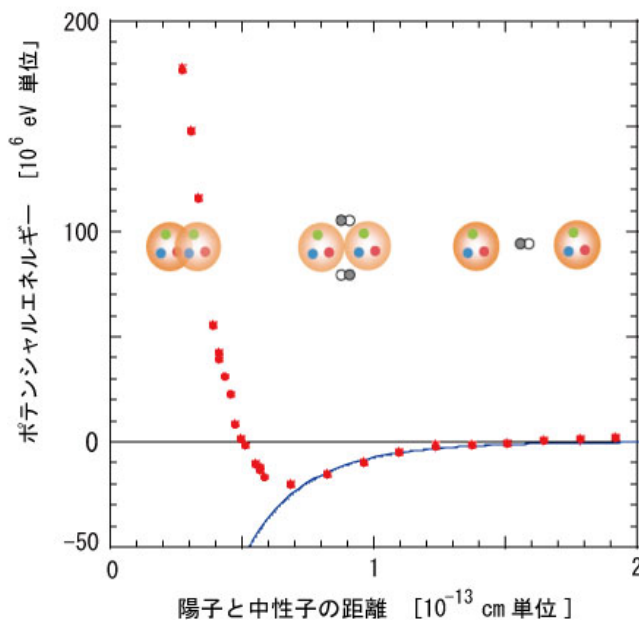


図1：スーパーコンピュータを用いて世界で初めて得られた核力の姿（赤丸）。湯川中間子論の予言は、青い実線。図中の模式図は、クォーク3つからなる陽子と中性子が、遠距離ではパイ中間子を交換し、至近距離では直接的に、力を及ぼしあっていることを示している。

主な結果

図1は、クエンチ近似と呼ばれる近似法のもとで、格子ゲージ理論の大規模数値シミュレーションを行った結果の一例です。さまざまな陽子と中性子の距離に対して、陽子と中性子の間のポテンシャルエネルギーをプロットしてあります(赤丸)。ポテンシャルエネルギーを斜面のように考えれば、斜面においたボールがころがる方向が力の働く向きで、斜面の傾きの大きさが力の強さになります。実線で書かれているのは、湯川博士が予言した湯川中間子一個を交換したことで生じるポテンシャルエネルギーです。

我々の理論計算は、遠方では湯川博士の提唱した核力の理解が正しいことを示しています。これは、提唱後72年を経た湯川中間子論が、初めて量子色力学から検証されたことを意味しています。さらに、陽子と中性子が 10^{-13} cm程度の距離まで近づくと、湯川中間子一個の交換だけでは説明できない引力が働くこと、もっと至近距離まで近づくと、引力の数十倍の強い斥力が働くことも分かります。つまり、核力の斥力芯が、世界で初めてクォークから導出されたわけです。我々の得た結果は、実験的に確認されている核力の様々な性質とも定性的に良く一致しています。

意義

今回の研究で明らかになった、陽子や中性子が遠距離では引きあうという事実や、至近距離では斥けあうという事実は、陽子・中性子の集合体である原子核の安定性の根本理由と密接に関係しています。また、至近距離での斥力芯の存在は、宇宙に浮かぶ巨大な原子核である中性子星の内部構造の研究や、超新星爆発の起爆原因解明に大きなインパクトを与えます。さらに、今回の研究をストレンジクォークを含むハイペロンと陽子や中性子の相互作用に拡張することで、茨城県東海村に建設中の大型陽子加速器施設J-PARCで計画されている奇妙な原子核(ハイパー原子核)の合成実験に対する理論的な指針を与えることもできます。

斥力芯は普遍的に存在するのか? 斥力芯を生み出す本質的メカニズムは何か?などの問題に対して、我々の方法で理論的に回答することができれば、最終的には「宇宙のバリオン物質はなぜ安定に存在できるのか?」という究極の問いに答えられるかもしれません。

○ 論文

米国物理学会のフィジカル・レビュー・レター 誌の6月29日号に掲載予定:

N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, "Nuclear Force from Lattice QCD", Physical Review Letters (2007) 6月29日号に掲載予定(電子版は6月25日の公開予定)。

○ 参考資料

フランク・ウィルツェック博士(2004年ノーベル物理学賞受賞者)による我々の研究成果の解説記事「斥力芯に新事実」がネイチャー誌の1月11号に掲載されています:
F. Wilczek, "Hard-core revelations", Nature **445**, 156-157 (2007)

7 用語解説

- *1. 湯川秀樹博士： 1935年に核力の中間子論を提唱しパイ中間子を予言。1949年ノーベル物理学賞を受賞。今年が湯川博士の生誕100年にあたります。
- *2. クォーク： 物質を構成する基本要素。6種類のフレーバー（アップ、ダウン、ストレンジ、チャーム、ボトム、トップ）と3種類の色電荷を持つ。陽子や中性子は、アップクォークとダウンクォークが3つ集まってできています。
- *3. 量子色力学： クォーク、およびクォーク間の力をなうグルーオンを支配する基本理論。南部陽一郎博士（シカゴ大学）がその原型を提唱しました。グロス、ウィルチェック、ポリツァーの3博士は、量子色力学の重要な性質である漸近自由性（高エネルギーになるほど相互作用が弱くなる現象）を理論的に発見し、2004年のノーベル物理学賞を受賞しました。
- *4. 格子ゲージ理論： 量子色力学などのゲージ理論を、時空に超立方格子を導入して定式化する理論。モンテカルロ法などを使ったゲージ理論の大規模数値シミュレーションに適しています。
- *5. ブルージーン： IBMのスーパーコンピュータの名称。昨年3月に高エネルギー加速器研究機構に導入されたのは、「IBM System Blue Gene Solution」で、総理論演算性能57.3TFlopsの国内最速クラス機種です。
- *6. 中性子星： 半径が約10km、重さは太陽質量の1-2倍の高密度天体で、内部は主として中性子の液体になっています。大質量星が超新星爆発を起こした後に残ると考えられています。
- *7. J-PARC： 茨城県那珂郡東海村に、高エネルギー加速器研究機構と日本原子力開発研究機構が共同で建設中の大強度陽子加速器を中心とする施設。2009年から稼働予定で、様々な理工学の研究に使用されます。
- *8. ハイパー原子核： 陽子や中性子からなる通常の原子核に、ストレンジクォークを含むハイペロンが混入した新しい原子核のことです。

○ 発表者

筑波大学大学院 数理物質科学研究科

物理学専攻 教授 青木 慎也

筑波大学 計算科学研究センター

研究員 石井 理修

東京大学大学院 理学系研究科

物理学専攻 教授 初田 哲男

○ 取材に関する窓口

筑波大学総務・企画部広報課 報道係 和田 雅裕

電話： 029-853-2040 F A X： 029-853-2014

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室 横山広美

電話： 03-5841-8856 F A X： 03-5841-1035

原子核の中にある“強い力”の起源を解明

-- 格子ゲージ理論とスーパーコンピュータが拓く物質研究 --

筑波大学大学院 数理物質科学研究科 教授
理研ブルックヘブン研究センター フェロー(兼務)

青木 慎也

筑波大学 計算科学研究センター 研究員

石井 理修

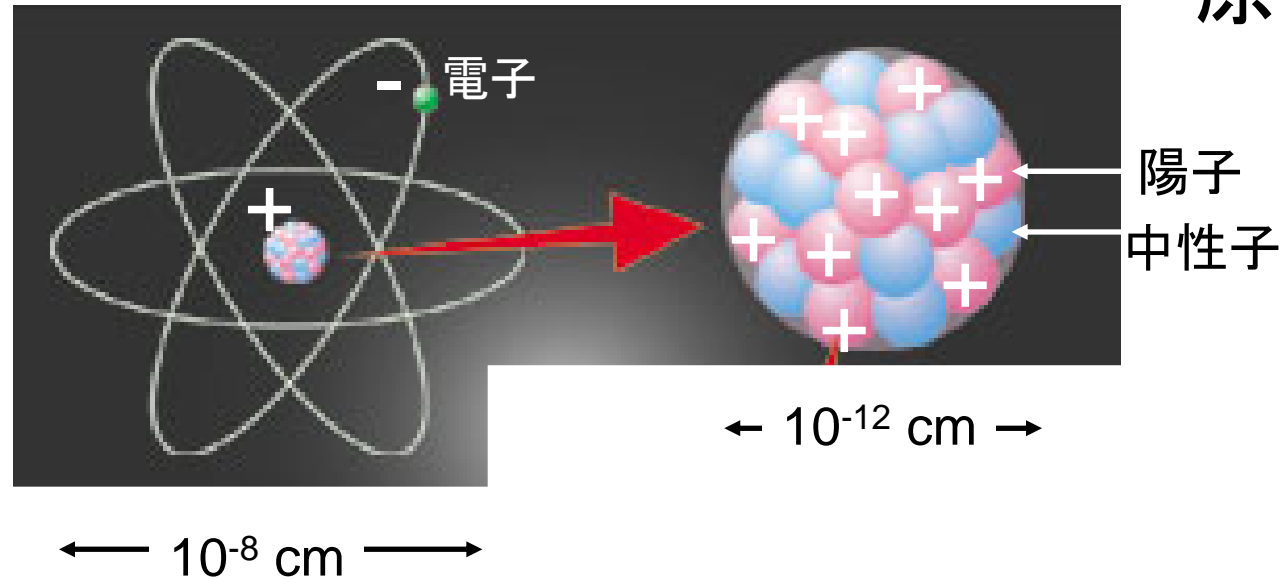
東京大学大学院 理学系研究科 教授

初田 哲男

研究の背景

原子

原子核



原子核内に陽子や中性子を閉じ込めておく”力”(核力)の起源

- ・ 正電荷を持つ陽子同士は”反発”する
- ・ 電荷を持たない中性子には電気的力は働かない

核力の特徴: 電気的反発力より強いが、到達距離は短い

湯川博士のアイデア

- 陽子や中性子は仮想的な粒子を交換することで力を伝達す
- 到達距離から仮想粒子の質量は陽子と電子の”中間”

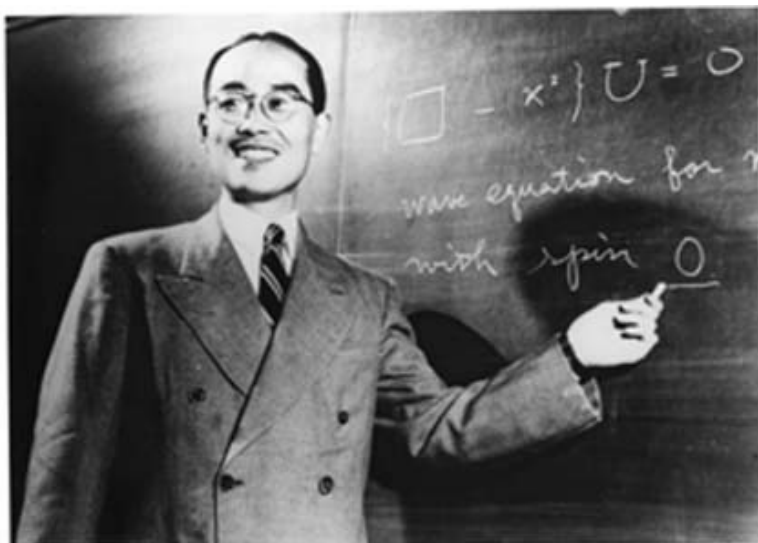
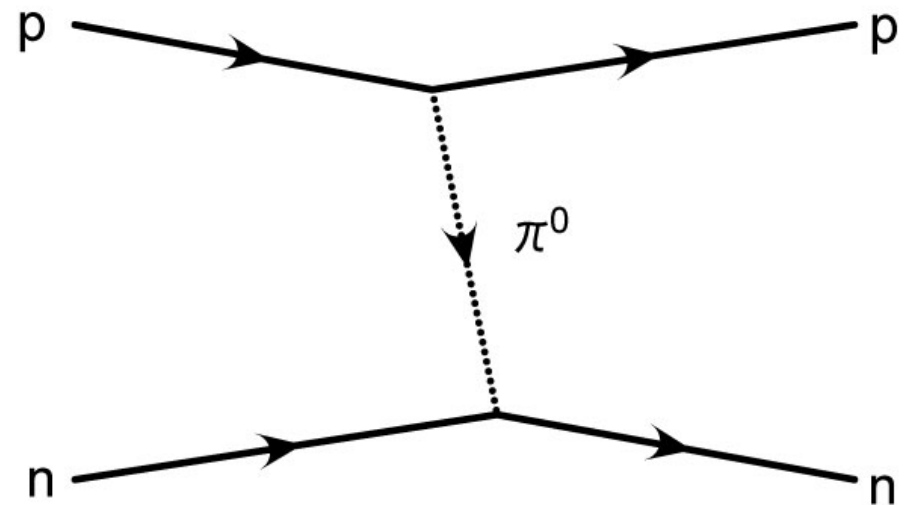
π 中間子

電氣的力(クーロン力)

光の交換で力を伝達

核力

π 中間子の交換で力を伝達

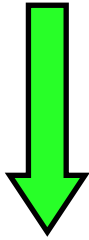


Scanned at the American
Institute of Physics

1949年 湯川博士ノーベル賞受賞

核力の実験事実

陽子や中性子を様々なエネルギーで衝突させる実験(散乱実験)により核力に関する知識が過去半世紀にわたり蓄積されてきた。



核力ポテンシャル

(ポテンシャルの傾きが力を与える)

中性子 陽子



近距離: 強い斥力芯

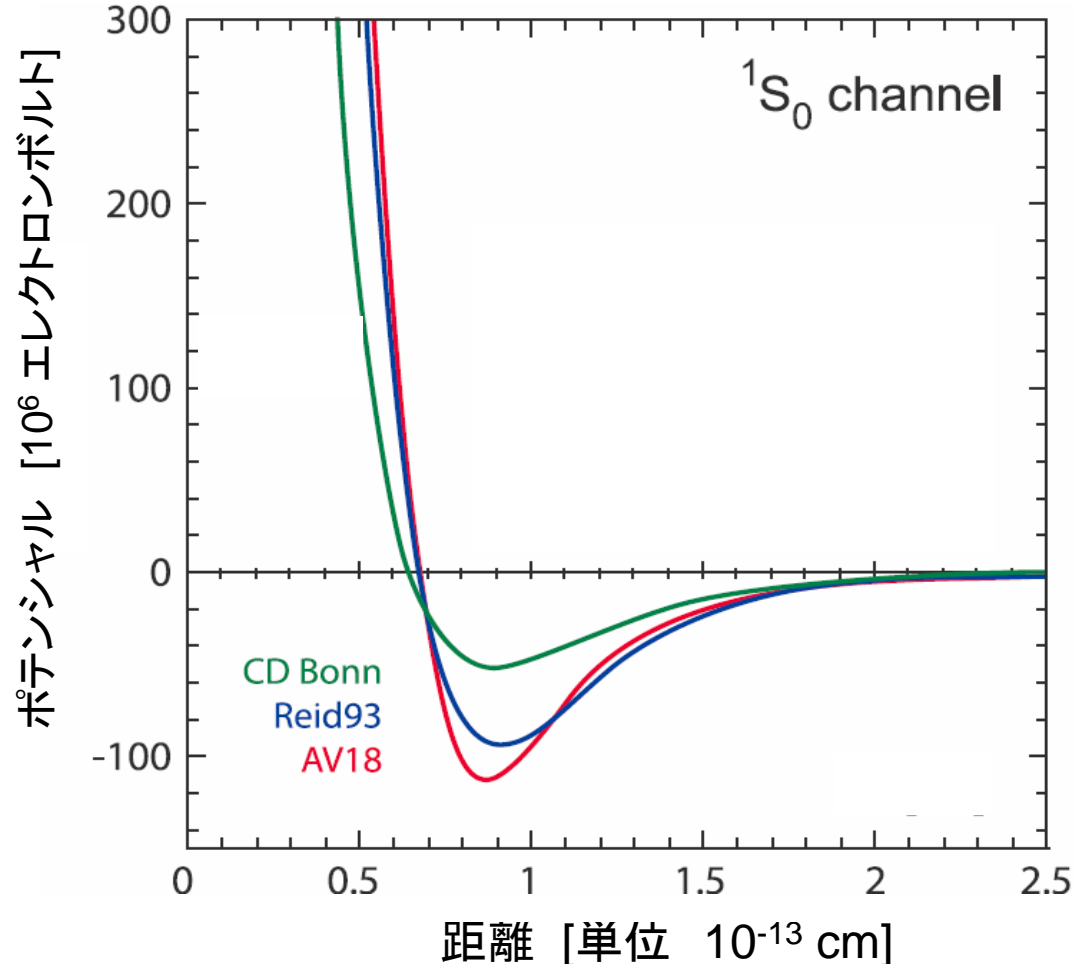
理論的に未解明

中間距離: 引力

2つの π 中間子や
他の中間子の交換?

遠距離: 弱い引力

1つの π 中間子の交換
(湯川ポテンシャル)

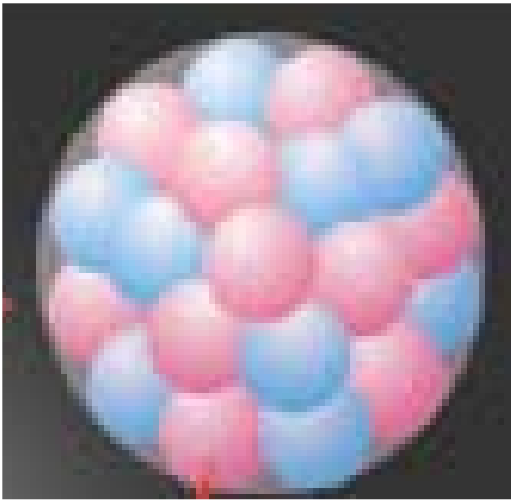


斥力芯の重要性

原子核の安定性

中性子星の存在

II型超新星爆発



カシオペアA 超新星残骸

クォーク

陽子・中性子・中間子(ハドロン)の仲間が
数百も見つかる

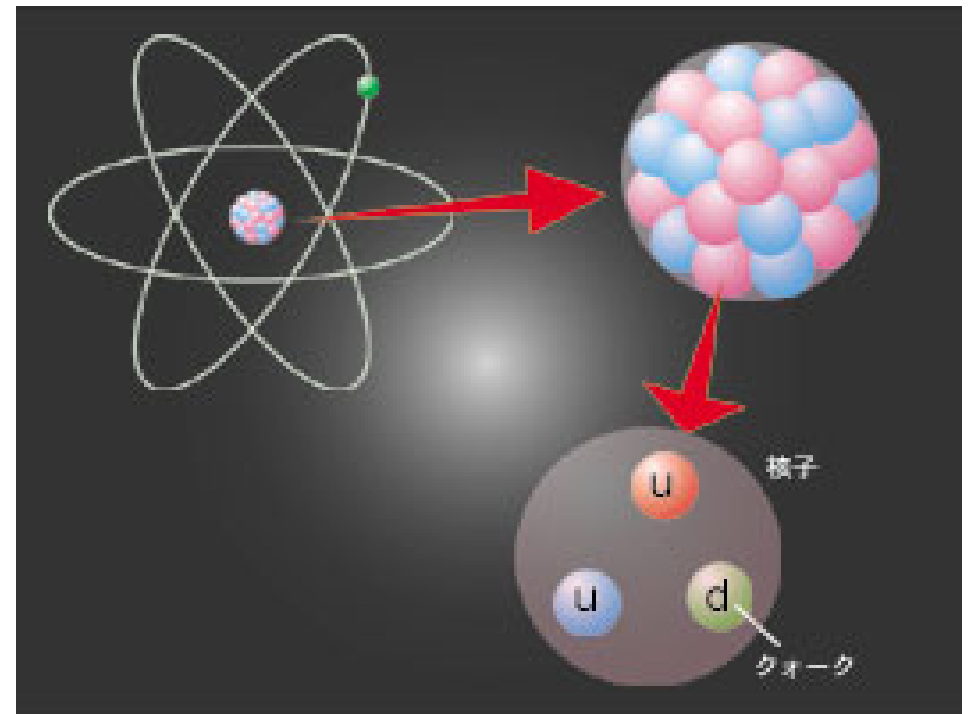
⇒ もはや”素粒子”でない

ハドロンはクォークという素粒子からできている



例:陽子 (uud), 中性子(udd)

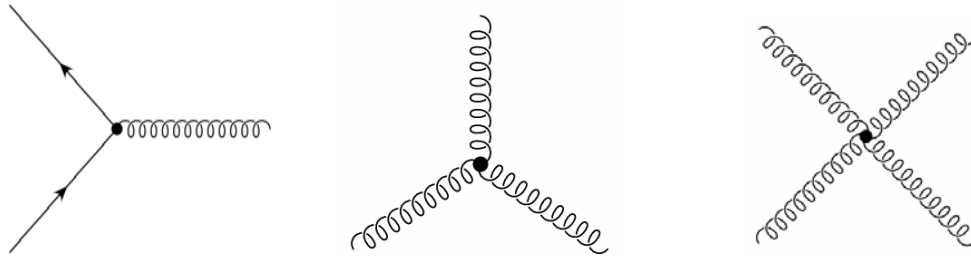
π 中間子 ($u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $u\bar{d}$, $d\bar{u}$)



10⁻¹³ cm

量子色力学(Quantum Chromo Dynamics)

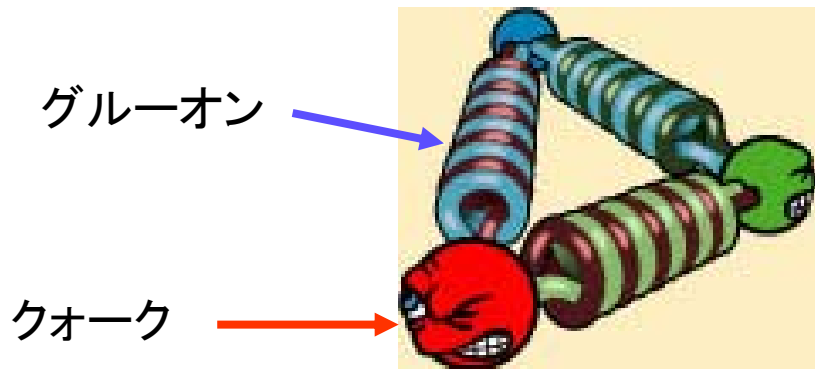
クォークとそれを結びつける
糊粒子(グルーオン)の力学



南部陽一郎博士が提唱(1965)



陽子や中性子の内部構造



クォークの閉じ込め
漸近自由性

漸近自由性の発見

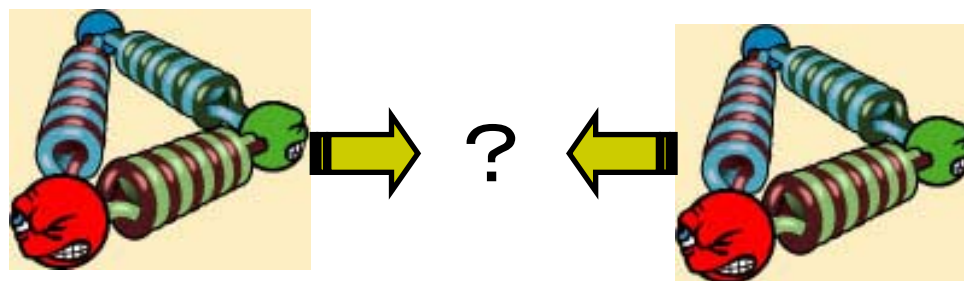


グロス博士 ポリツァー博士 ウイルチェック博士

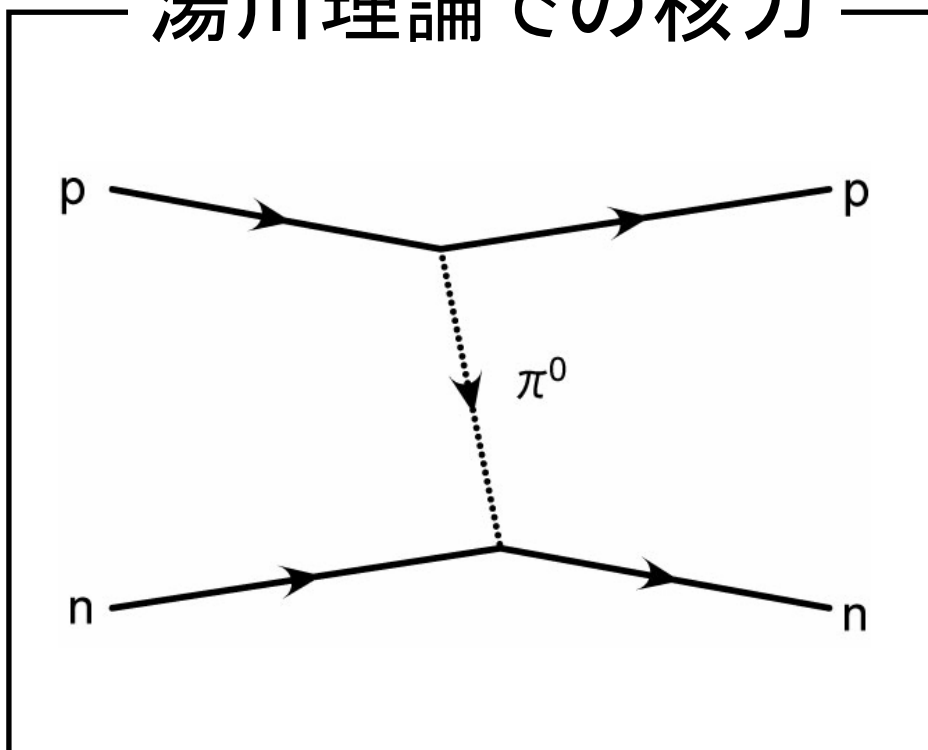
(2004年ノーベル物理学賞)

核力を量子色力学(QCD)から導けるか？

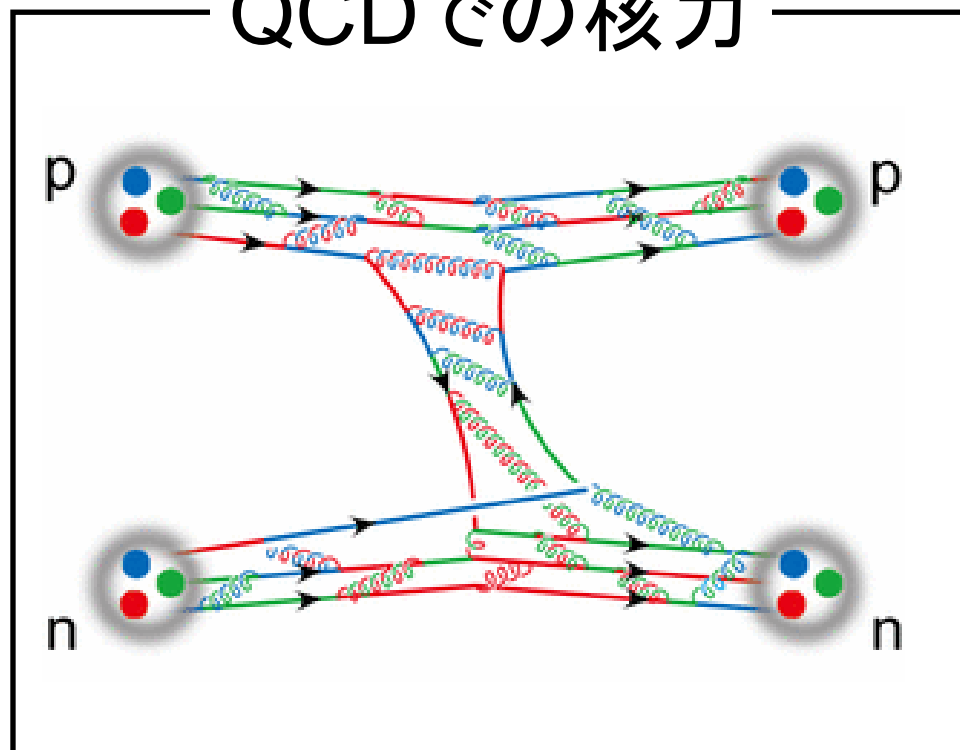
素粒子・原子核理論における超難問



湯川理論での核力



QCDでの核力





湯川秀樹博士

1907年1月23日生

1949年ノーベル物理学賞

朝永振一郎博士

1906年3月31日生

1965年ノーベル物理学賞



フランク・ウィルチェック博士 (2004年ノーベル物理学賞)
湯川朝永生誕百年記念講演 (京都大学、1月 23日, 2007)

http://tkynt2.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~hatsuda/Wilczek_talk.pdf

- ・湯川博士の発見した偉大な考えは、粒子と力の間に完全な対応関係があるということです。粒子があれば必ず力が生まれ、一方で、力はなんらかの粒子によって生み出されます。
- ・湯川博士のアイデアは、強い力(核力)を理解する上での第一歩でした。しかし、強い力の現代的理解に至るには、さらに多くの新しいアイデアが必要です。
- ・ちょうど数週間前、石井博士・青木博士・初田博士は、量子色力学(QCD)に基づく核力の世界最初の計算を発表しました。そして、彼らは、核力の斥力芯を見出したのです。これは、物質構造の基本的理解にいたる上での、画期的な出来事(Major Milestone)です。

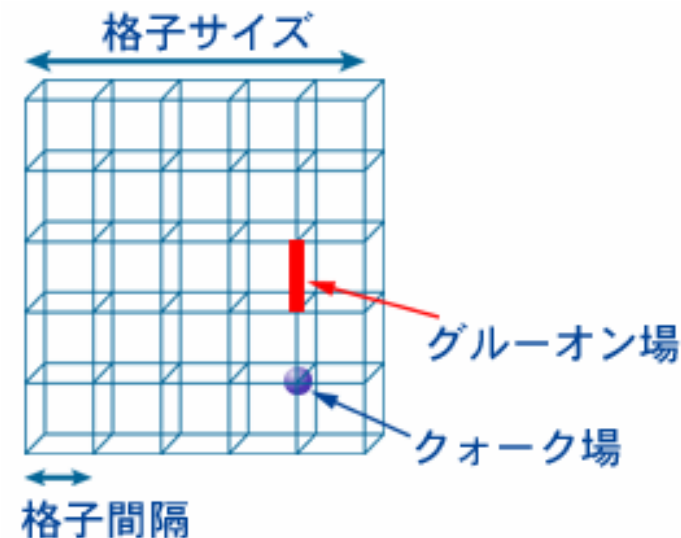
格子ゲージ理論と高速スーパーコンピュータ

格子ゲージ理論 ウィルソン博士(1982年ノーベル物理学賞)

時空格子上での数値シミュレーションにより、
QCDの複雑な計算を実行できる。

例：陽子や π 中間子の質量などが計算できる。

筑波大学計算科学研究センター：
格子ゲージ理論研究の世界的拠点



高速スーパーコンピュータ「ブルージーン」 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

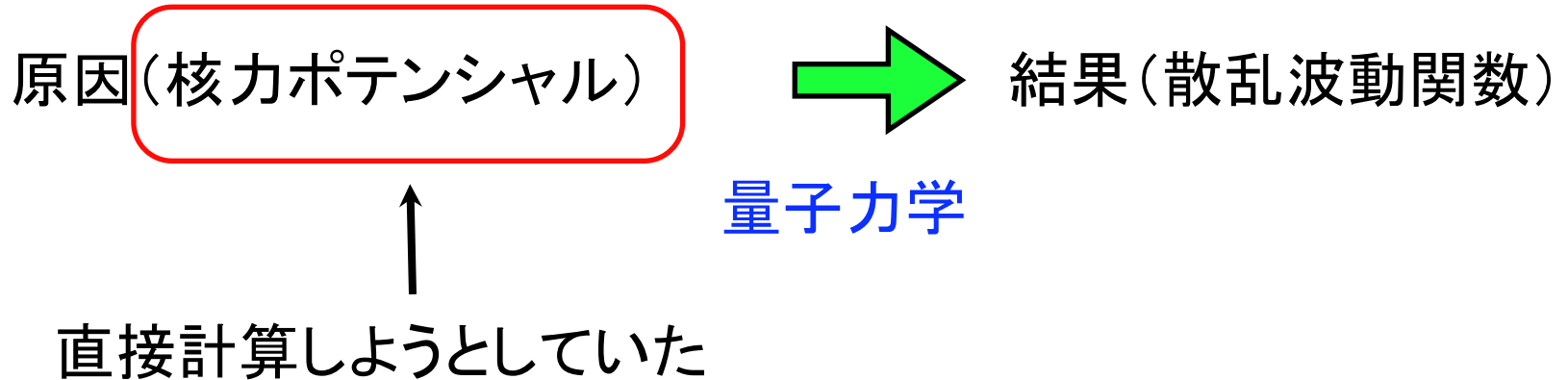


国内最高速計算機の一つ (1秒間に約50兆回の演算可能)

今回の核力研究に必要な膨大な計算は、
「ブルージーン」により初めて可能になった。
(今回の計算時間：約3000時間=4ヶ月)

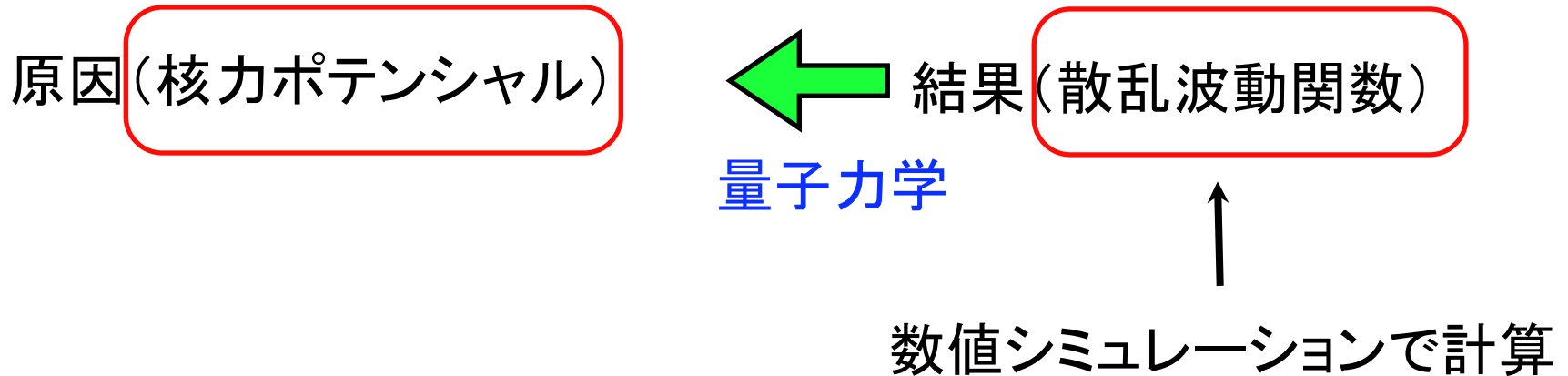
計算機だけでなく頭脳も重要（理論的飛躍）

これまで



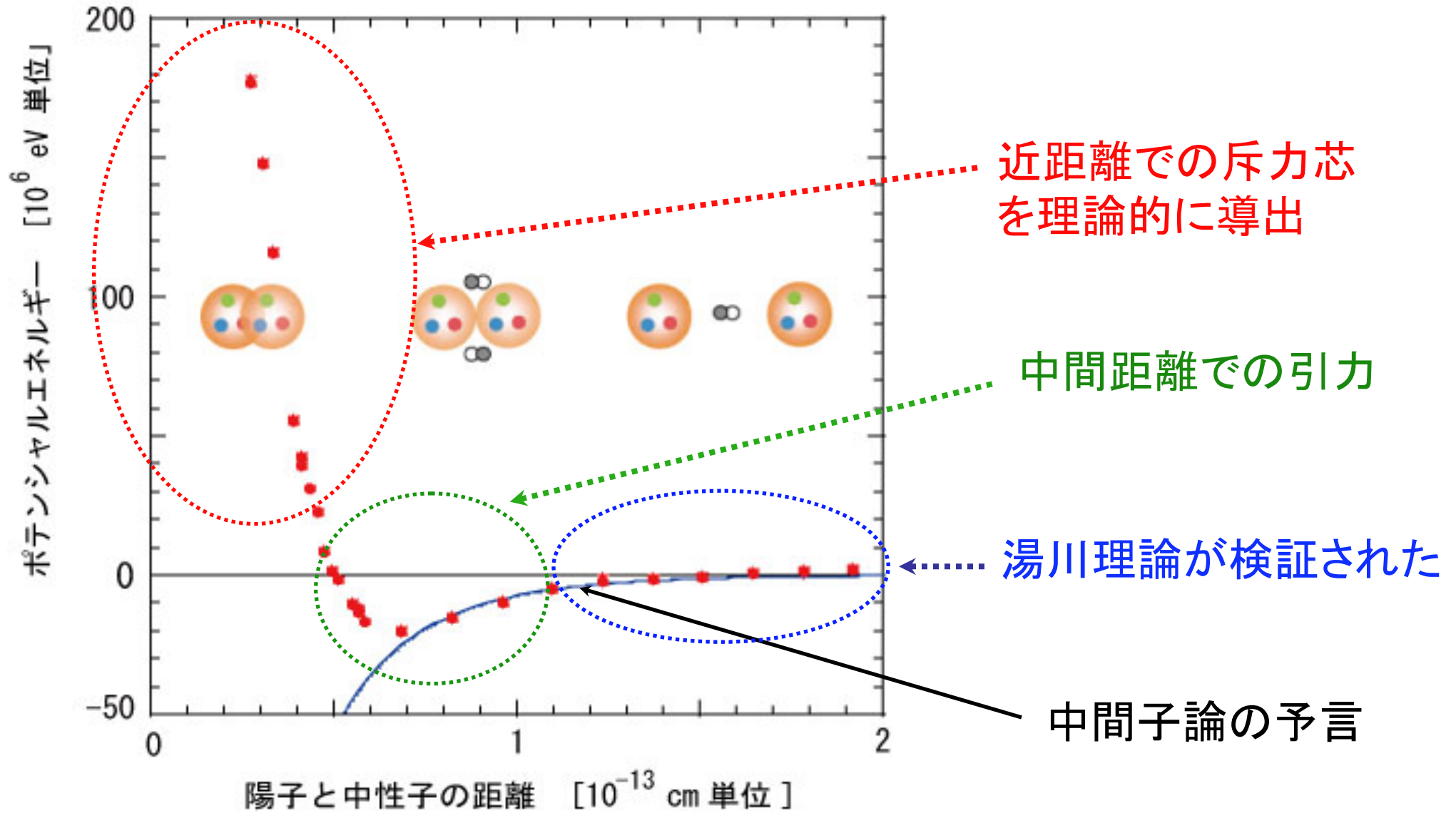
CP-PACS法

波動関数からポテンシャルを逆算

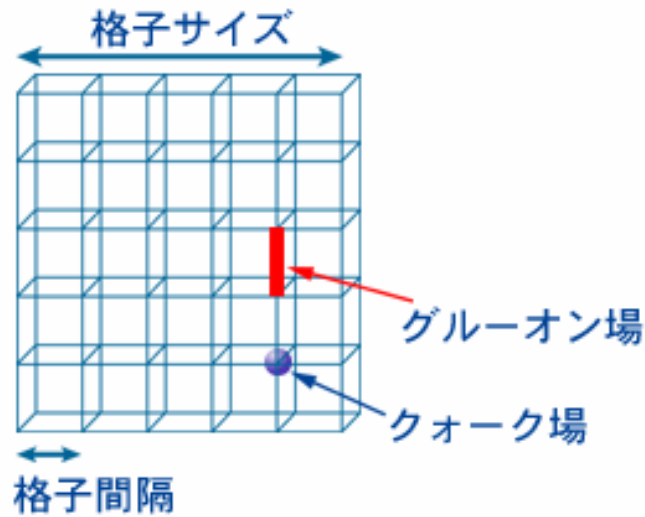


CP-PACS: 筑波大学計算科学研究センターにあった超並列計算機。
1996年にTop500の第1位。PACS-CSはその後継機。

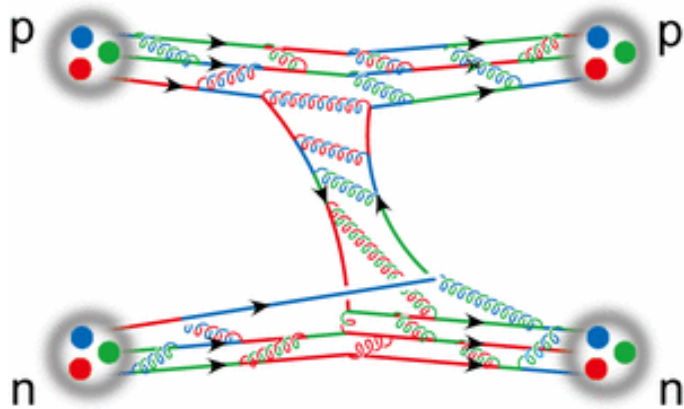
結果の一例



より高い精度に向けて

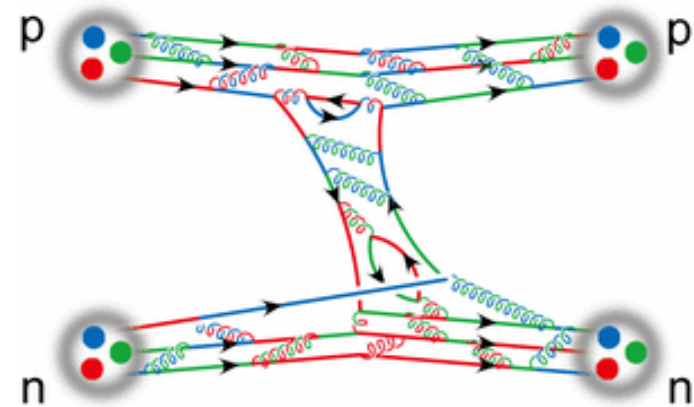


現在：空間体積 $(4 \times 10^{-13} \text{ cm})^3$
約30000格子点
クエンチ近似



➡ 10-20%の精度

将来：より多い格子点
クエンチ近似なし



➡ 数%の精度

今回の研究の意義と今後

陽子や中性子が、遠距離では引き合い、近距離では強く斥けあうという核力の性質を、基本粒子としてのクォークから明らかにした。

↔ { 原子核(物質)の安定性の理解
中性子星の内部構造の理解
超新星爆発の起爆原因の理解

今後1: スレンジクォークを含むハイペロンと陽子・中性子、ハイペロン同士に働く“未知の力”の予言(進行中)。

↔ { 東海村に建設中の大強度陽子加速器施設J-PARC
(高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究
開発機構の共同プロジェクト)における
ハイパー原子核研究の理論的指針を与える。



今後2: 核力の謎を理論的に完全に理解できると、「物質はなぜ安定に存在できるのか?」という究極の問いに答えられるかもしれません。

○ 論文

米国物理学会のフィジカル・レビュー・レター 誌に掲載予定:

N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, "[Nuclear Force from Lattice QCD](#)",
Physical Review Letters, 6月29日号、2007

○ 参考資料

フランク・ウィルツェック博士(2004年ノーベル物理学賞)による
我々の成果の解説記事「[斥力芯に新事実](#)」がネイチャー誌に掲載済:

F. Wilczek, "Hard-core revelations", Nature **445**, 156-157 (2007)

研究グループについて

青木慎也
(筑波大学)



素粒子理論。
格子ゲージ(QCD)理論
が専門。

石井理修
(東京大学→筑波大学)



原子核理論。
ハドロン構造論が専門。
計算機のエキスパート。

初田哲男
(東京大学)



原子核理論。
クォーク・グルーオン・
プラズマの理論が専門。