

# 格子QCDと核力の出会い

---

青木 慎也

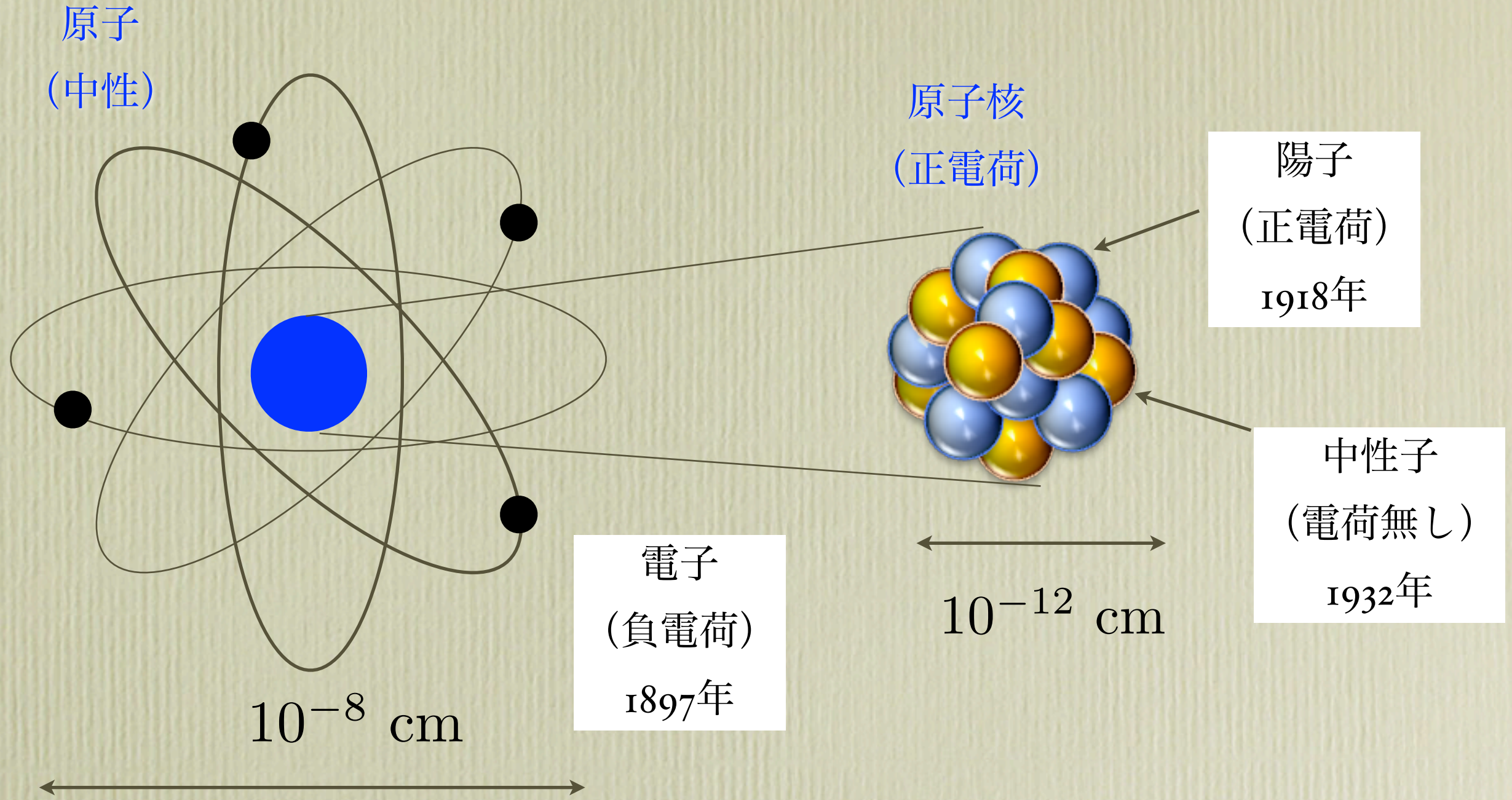
筑波大学 数理物質科学研究科 物理学専攻

2012年仁科記念賞・つくば賞 受賞講演会

2013年2月8日 筑波大学 計算科学研究センター



# 核力とは



原子核内に核子（陽子や中性子）を閉じ込めている”力”は何か？  
核力

重力、電磁気力

特徴：電气的反発力より強いが、到達距離は短い



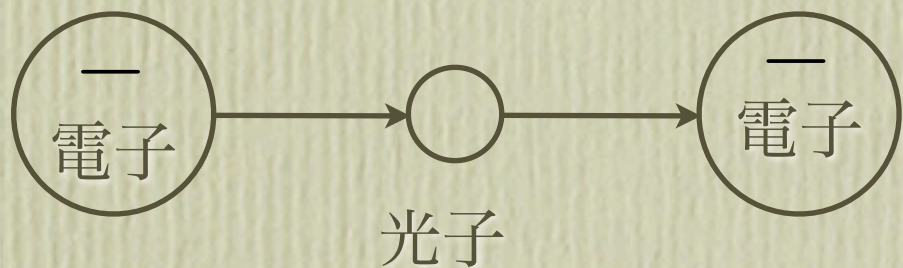
# 湯川の中間子論

1935年

- 陽子や中性子は仮想的な粒子を交換する事で力を伝達する。
- 到達距離は質量に反比例  $\rightarrow$  仮想粒子の質量は陽子と電子の”中間”  $\pi$ 中間子

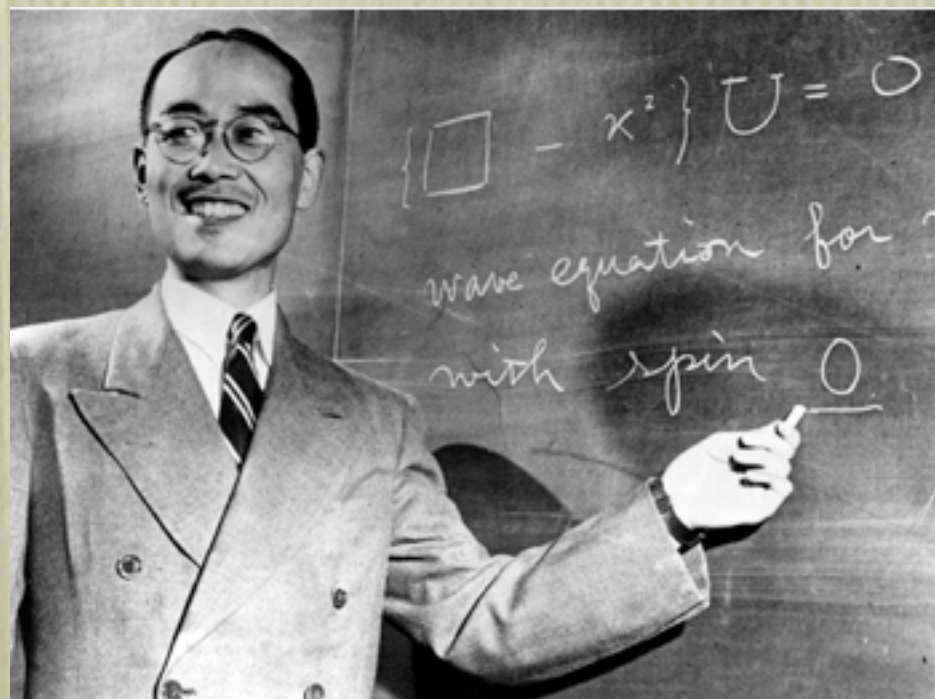
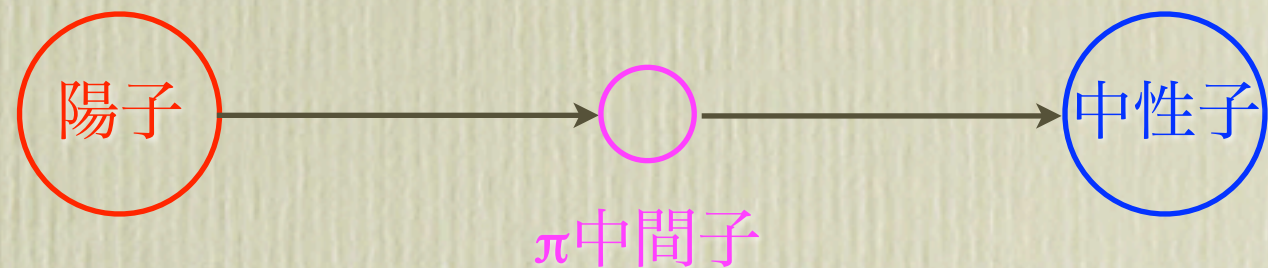
例：電氣的力（クーロン力）

光子（電磁波）の交換で力を伝達

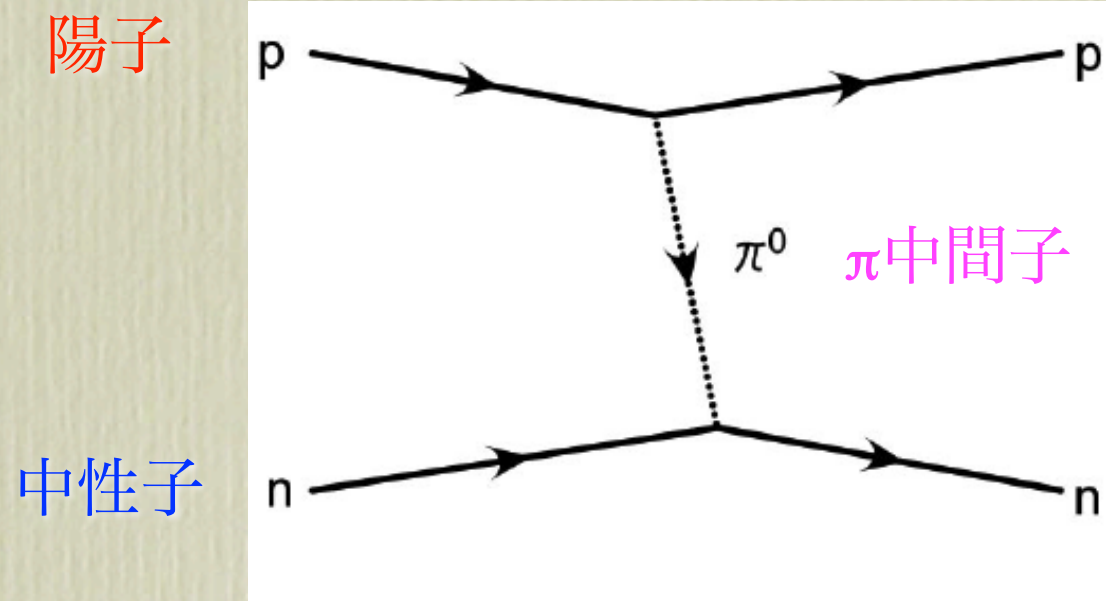


核力

$\pi$ 中間子の交換で力を伝達



1949年 湯川博士ノーベル賞受賞



ファイマン図（素粒子の運動を記述する図）

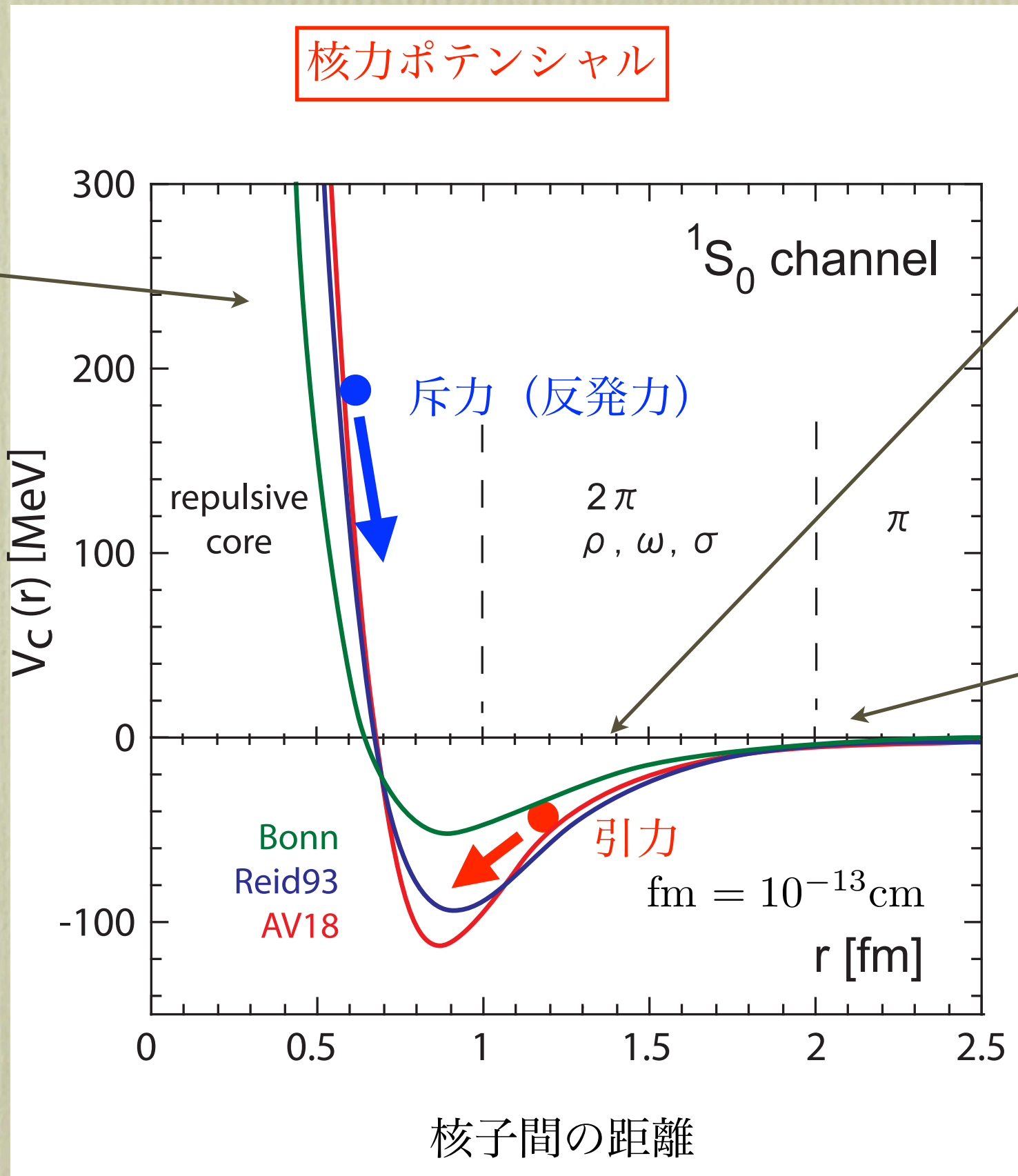


# 湯川以後の核力の全体像

ポテンシャル（位置エネルギー）：傾きが力の大きさと方向を示す



Jastrow 1951  
近距離での強い  
斥力（斥力芯）



武谷 1951  
複数 $\pi$ 中間子の交換  
重い中間子の交換



湯川 1935  
 $\pi$ 中間子の交換



# 近距離斥力（斥力芯）

重要性：原子核が潰れずに、一定の大きさを保つためには、引力だけではなく、斥力芯の存在が必要不可欠。（物質の安定性）



斥力芯の存在は、中性子星、超新星爆発などの天体現象などにも重要。

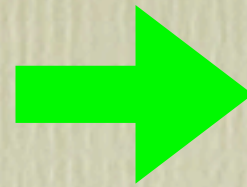
斥力芯の起源：いろいろな説明が提案された（例：南部陽一郎による $\omega$ 中間子の導入）が、未だに決定的なものはない。近距離なので、核子の内部構造が重要になる。

斥力芯の起源を含めた核力の理解は、素粒子及び原子核物理の重要な未解決問題の1つ



# 核子の内部構造：クォーク

ハドロン（陽子、中性子、中間子の仲間の総称）  
は数百種類の存在が確認



もはや”素粒子”ではない

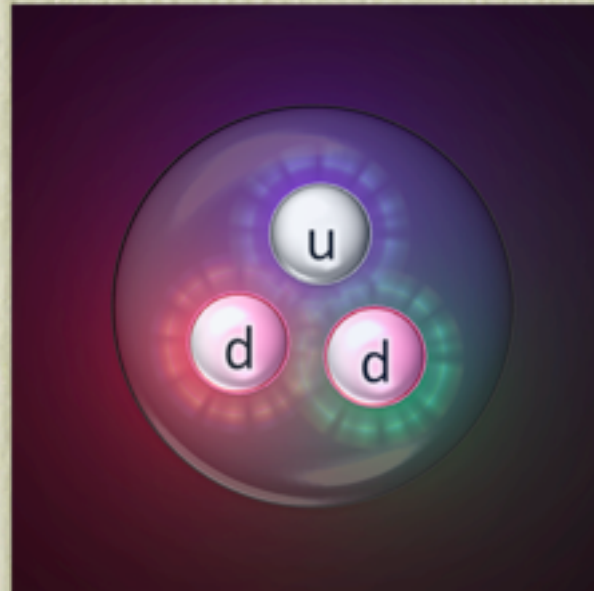
ハドロンはクォークという素粒子から出来ている

重粒子  
クォーク 3つ

陽子(uud)



中性子(udd)



中間子  
クォークと反クォーク  
 $\pi$ 中間子

( $u\bar{u}$ ,  $d\bar{d}$ ,  $u\bar{d}$ ,  $d\bar{u}$ )

陽子や中性子などは、アップ(u)、ダウン(d)の2種類から  
出来ている

小林益川理論は6つ  
のクォークの存在を  
予言した



電荷  $+2e/3$

電荷  $-e/3$



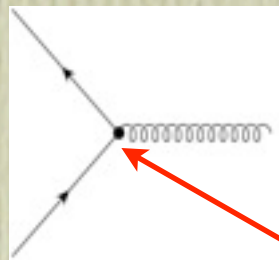


# 量子色力学(Quantum ChromoDynamics)

QCD:クォークとそれを結びつけるグルーオン (糊粒子) の力学

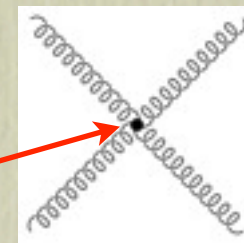
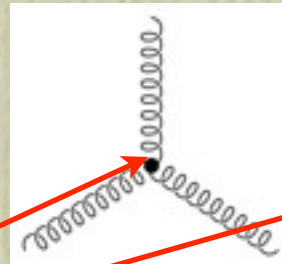
南部陽一郎博士が提唱(1965)

クォーク



グルーオン

クォーク



グルーオン同士の相互作用

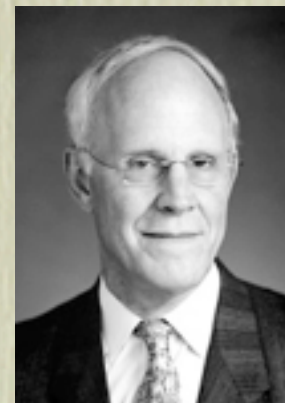
”色電荷”

(量子色力学)

## QCDの特徴

- 近距離で力が弱くなる (漸近的自由性)  
(2004年ノーベル物理学賞)
- 長距離では力が強くなり、単独のクォークを分離できない (クォークの閉じ込め)

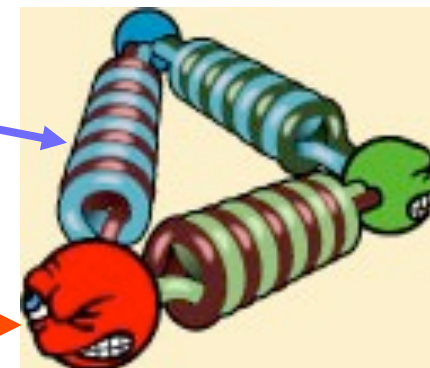
グロス博士   ポリツァー博士   ウイルチェック博士



## 核子の内部構造

グルーオン

クォーク



クォークの閉じ込め  
漸近自由性



# 格子量子色力学

QCDは「クォークの閉じ込め」からと分かるように力（相互作用）が強いために、今まで成功を取っていた（弱い力を仮定した）方法が使えない。

## 格子QCD

連続的な時空間を”格子”で近似して、そこにQCDを定義。

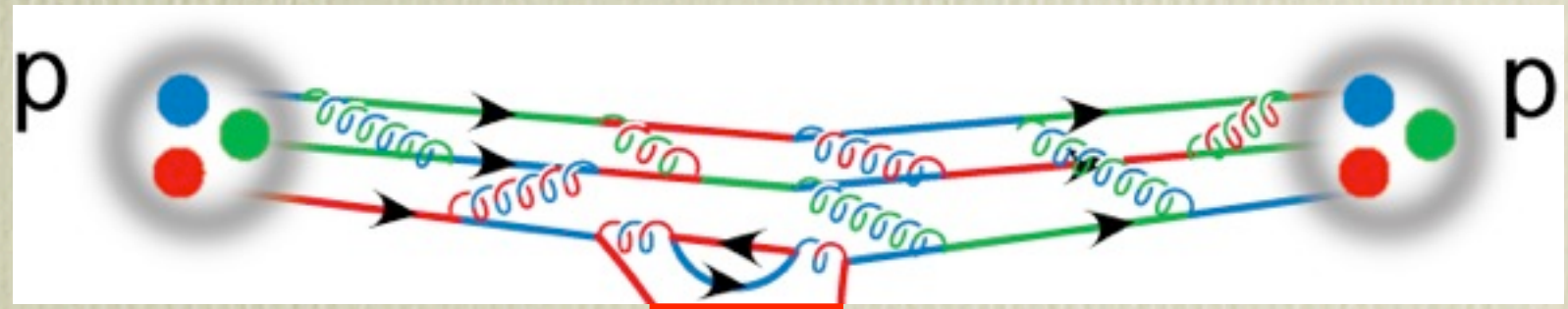
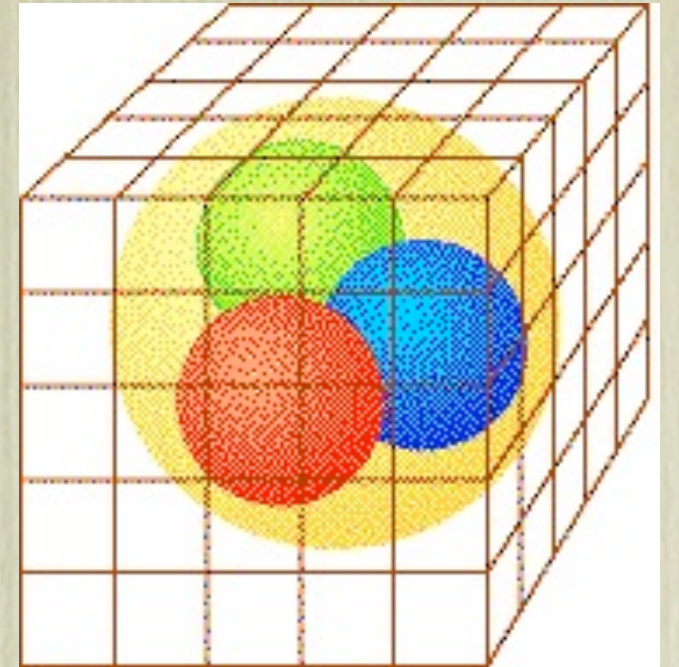
QCDの複雑な過程を、スーパーコンピュータを使った数値シミュレーションによって計算することが可能。

日本（つくば）は格子QCD計算の世界的な拠点の1つ。

筑波大学計算科学研究センター、高エネルギー加速器研究機構(KEK)

最近、ようやく核子などのハドロンの質量（1体問題）が高精度で計算できるようになってきた。

相互作用（2体問題）は  
まだまだ難しかった。





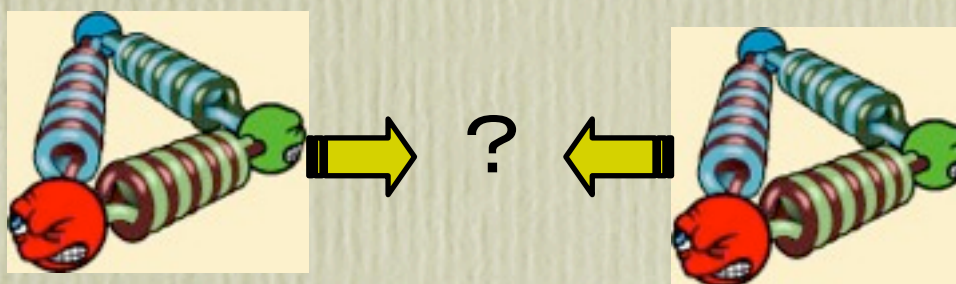
# 核力を量子色力学(QCD)から導けるか？

『現在でも核力の詳細を基本方程式から導くことはできない。核子自体がもう素粒子とは見なされないから、いわば複雑な高分子の性質をシュレディンガー方程式から出発して決定せよというようなもので、むしろこれは無理な話である。』

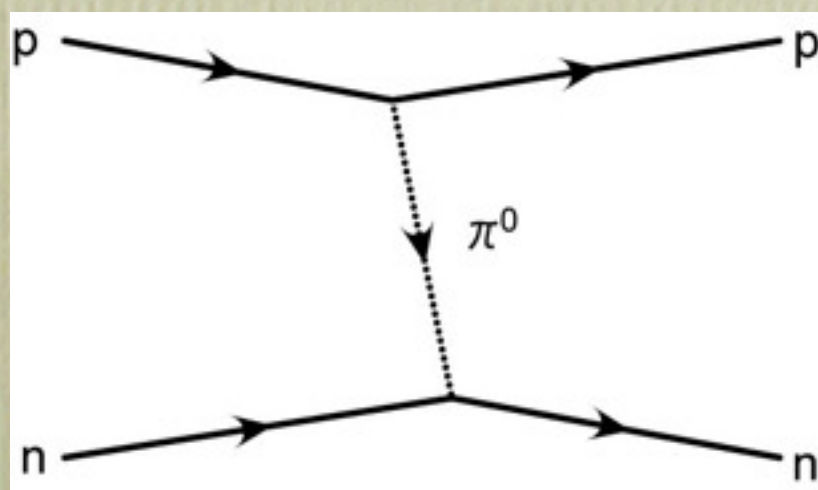
南部陽一郎、『クォーク』  
(講談社ブルーバックス、1997)



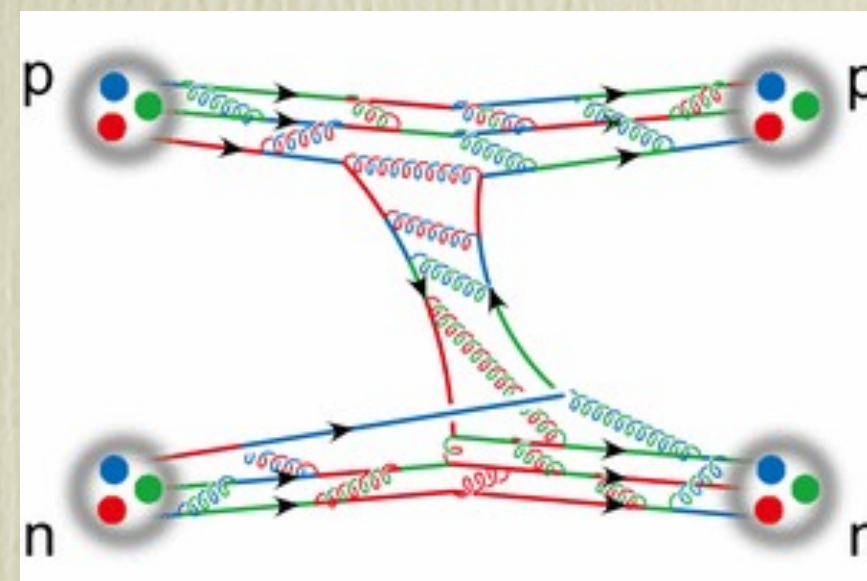
## 素粒子・原子核理論における超難問



## 湯川理論での核力



## QCDでの核力





## 2. 格子QCDによる核力ポテンシャル



# 我々の戦略

詳細: Aoki, Hatsuda & Ishii, PTP123(2010)89.

**Step 1** Nambu-Bethe-Salpeter (NBS) 波動関数を定義。

$$\varphi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \langle 0 | N(\mathbf{x} + \mathbf{r}, 0) N(\mathbf{x}, 0) | NN, W_k \rangle$$

クォークが3つ

エネルギー

$$W_k = 2\sqrt{\mathbf{k}^2 + m_N^2}$$

運動エネルギー

$$\epsilon_k = \frac{\mathbf{k}^2}{2\mu}$$

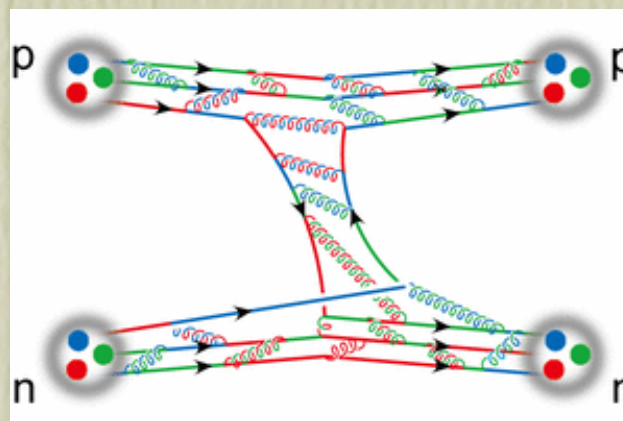
換算質量

$$\mu = m_N/2$$

遠方では自由場 !

$$H_0 = \frac{-\nabla^2}{2\mu}$$

散乱状態



$$[\epsilon_k - H_0]\varphi_{\mathbf{k}}(\mathbf{x}) \simeq 0$$



さらに部分波

$$r = |\mathbf{r}| \rightarrow \infty$$

$$\varphi_{\mathbf{k}}^l \rightarrow A_l \frac{\sin(kr - l\pi/2 + \delta_l(k))}{kr}$$

$\delta_l(k)$

QCDの散乱位相差!



## Step 2 自由場からのズレを非局所ポテンシャルとして定義

$$[\epsilon_k - H_0] \varphi_{\mathbf{k}}(\mathbf{x}) = \int d^3y U(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \varphi_{\mathbf{k}}(\mathbf{y})$$

このポテンシャルは非局所だが波動関数のエネルギーには依存しない。

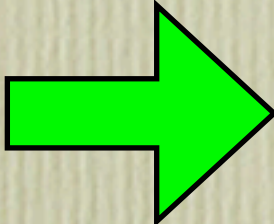
実際、しきい値以下のエネルギーの全ての波動関数を用いて、以下のように構成できる。

$$U(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k}' \leq W_{\text{th}}} [\epsilon_k - H_0] \varphi_{\mathbf{k}}(\mathbf{x}) \eta_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'}^{-1} \varphi_{\mathbf{k}'}^\dagger(\mathbf{y})$$

$\eta_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'}^{-1}$ : inverse of  $\eta_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} = (\varphi_{\mathbf{k}}, \varphi_{\mathbf{k}'})$

$$W_{\text{th}} = 2m_N + m_\pi$$

$\pi$ 中間子生成のしきい値


$$\int d^3y U(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \phi_{\mathbf{p}}(\mathbf{y}) = \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} [\epsilon_k - H_0] \varphi_{\mathbf{k}}(x) \eta_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'}^{-1} \eta_{\mathbf{k}', \mathbf{p}} = [\epsilon_p - H_0] \varphi_{\mathbf{p}}(x)$$

ポテンシャルは物理量ではないので、いろいろな定義が可能。ただし、散乱位相差などの物理量を再現することが必要。

我々のポテンシャルは定義から正しいQCDの散乱位相を再現することが保証されている。



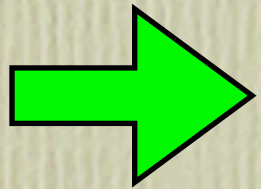
Step 3 実際の計算では、非局所ポテンシャルを微分展開する。

$$U(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = V(\mathbf{x}, \nabla) \delta^3(\mathbf{x} - \mathbf{y})$$

$$V(\mathbf{x}, \nabla) = \underbrace{V_0(r)}_{0\text{次(LO)}} + \underbrace{V_\sigma(r)}_{0\text{次}} (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2) + \underbrace{V_T(r)}_{0\text{次}} S_{12} + \underbrace{V_{LS}(r)}_{1\text{次}} \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + O(\nabla^2)$$

$$S_{12} = \frac{3}{r^2} (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{x})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{x}) - (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2) \quad \text{テンソル演算子}$$

スピン



最低次では

$$V_{LO}(\mathbf{x}) = \frac{[\epsilon_k - H_0] \varphi_{\mathbf{k}}(\mathbf{x})}{\varphi_{\mathbf{k}}(\mathbf{x})}$$

Step 4 このポテンシャルを使ってシュレディンガー方程式を解き、散乱位相差などを求める。

ただし、微分展開を途中で打ち切った場合は誤差が生じる。

$\delta_L(k)$       誤差なし

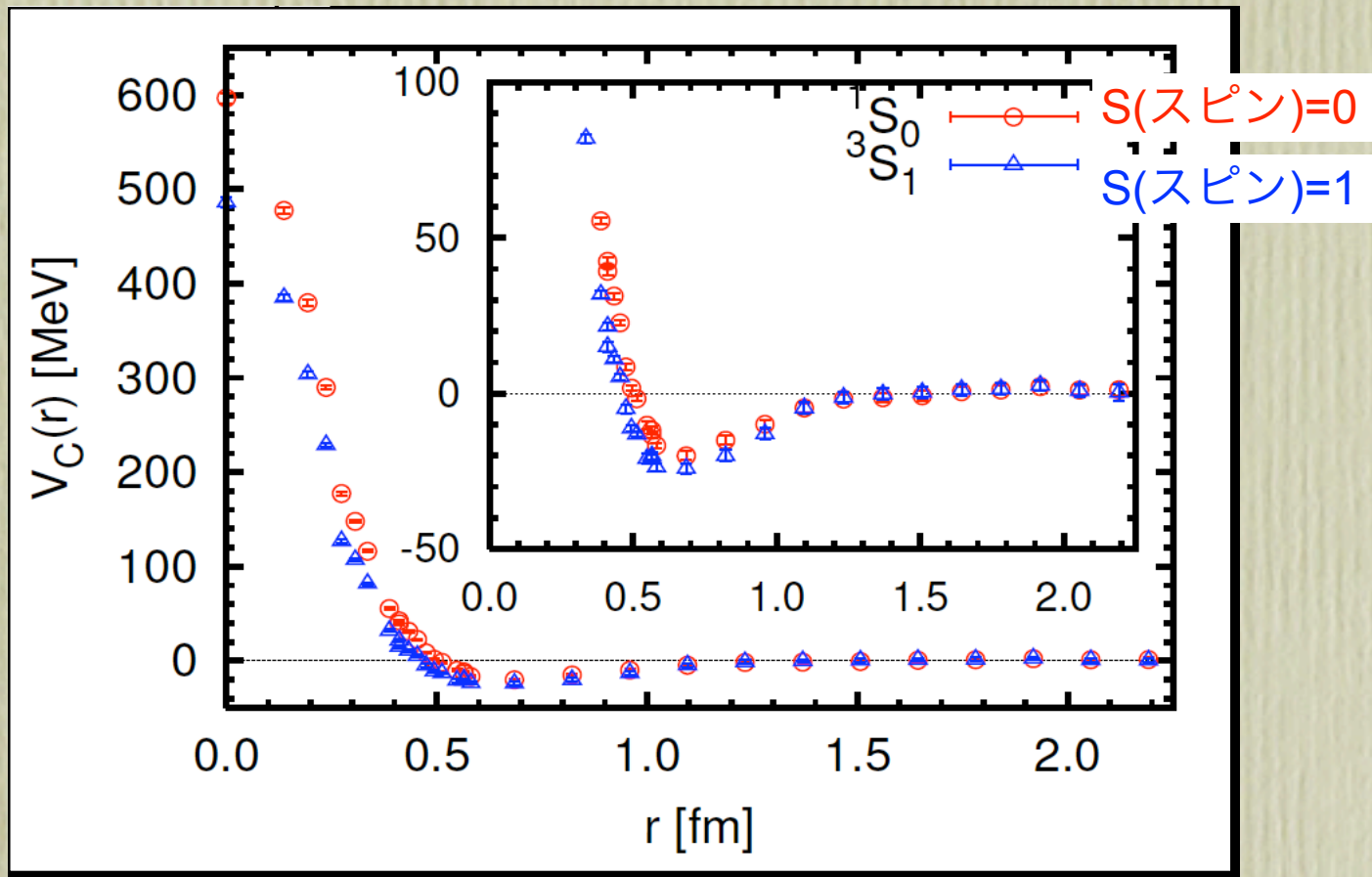
$\delta_L(p \neq k)$       微分展開による近似値、誤差有り



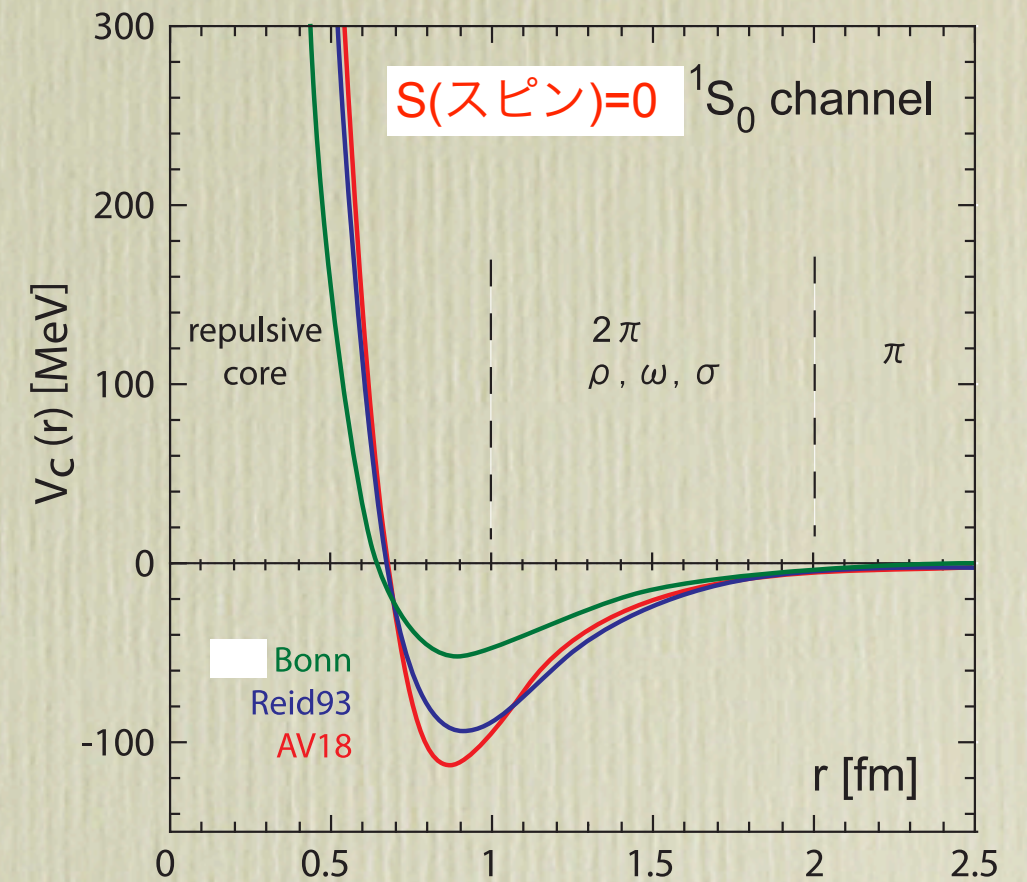
# 最初の結果

## クエンチ近似の計算

$$m_\pi \simeq 0.53 \text{ GeV} \quad k \simeq 0$$



## 実験から決めたポテンシャル



Ishii-Aoki-Hatsuda, PRL90(2007)0022001

核力ポテンシャルの定性的な性質が格子QCDで再現された！



# 研究の経緯 (裏話)

## 人間関係(2005年頃)

青木 (素粒子理論、格子QCD理論が専門。)

初田 (原子核理論、ハドロン物理)

石井 (原子核理論、ハドロン物理)

東大初田研究室の研究者(2005年当時)

過去に共著論文が2本

1988-1990 青木、初田はアメリカのニューヨークでポスドク、交流有り。

1990-1993 初田、ワシントン大学 (シアトル) 。 1992年に共著論文。

1991- 青木、筑波大学。

1993-1998 初田、筑波大学。 1997年に共著(+他2名)論文。

1998-2000 初田、京都大学。

2000-2012 初田、東京大学。

2005-2006 石井、東京大学。

分野は近いが、通常は一緒に研究をしていた訳では無かった



# 共同研究開始まで

2004年春：初田、学会の講演で、石塚成人、山崎剛氏（筑波大）らの仕事を知る

初田「核力の研究に使えそう。」

2004年秋：青木、東大（本郷）で集中講義。初田は学生時代の指導教官である玉垣氏が核力研究の専門家であったため、核力の重要性を認識しており、石塚らの方法が核力研究に使えないかと青木に相談。是非やろうと盛り上がるが具体化せず。

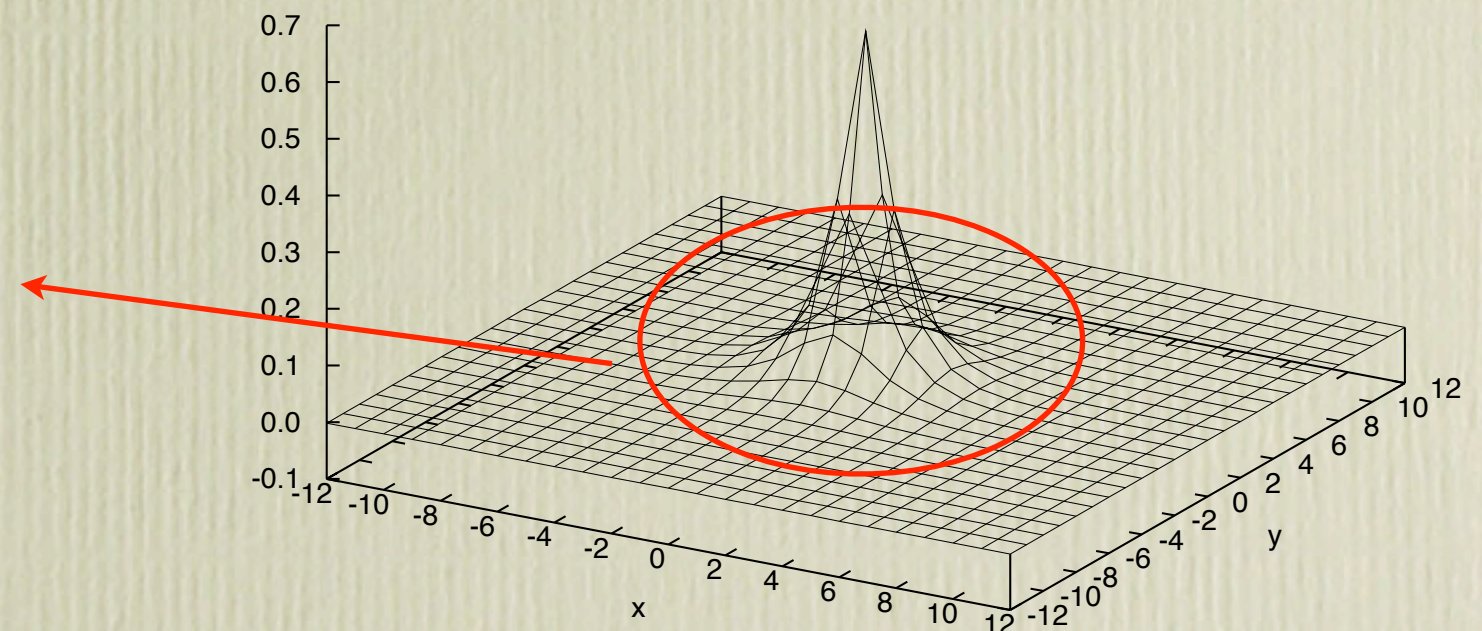
2005年2月：初田、筑波大での研究会で、石塚成人氏（筑波大）の講演を聞き確信を深める

CP-PACS Collaboration: S.Aoki, M.Fukugita, K.-I.Ishikawa, N. Ishizuka, Y.Iwasaki, K.Kanaya, T.Kaneko, Y.Kuramashi, M.Okawa, A.Ukawa, T.Yamazaki, T.Yoshie, Phys. Rev. D71(2005)094504.

格子QCDによる2つの $\pi$ 中間子間の相互作用の研究

”ポテンシャル（？）”

相互作用の無い領域を使って情報を引き出す方法を使った





2005年6月頃：初田が筑波大の格子QCDの専門家に核力の重要性についてinformalな講演をする。皆、あまり乗り気でないが、青木、初田は、2人だけでもやろうと決めるが、具体化せず。

2005年10月：石井が初田の研究員として着任。原子核理論出身であるが格子QCDの計算の経験もある石井が共同研究に参加。石井がものすごいやる気をだし、研究が具体的に進み始める。以後は、本郷や筑波で定期的に会合を持ち、共同研究を進める。



# タイミングなど

青木は、格子QCD研究の専門家であったが、2005年に初田から核力研究の重要性を聞くまで、核力に関する知識はほとんどなかった。

原子核理論出身で格子QCDの経験もある石井が、たまたま初田の近く来たのは幸運であった。当時、初田、青木は忙しく、じっくりと数値計算に取り組める人材が必要であった。

2006年春からKEKに世界最高速クラスのスーパーコンピュータであるBlueGene/Lが導入。当時、我々の研究は海の物とも山の物ともつかない状態であったのに、うるさいことを言わずかなり自由に使わせて貰えたのが研究の成功に繋がった。計算のためのプログラム開発は石井が主に担当し、経験のある青木が協力。



BlueGene/L@ KEK

当時、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、BlueGene/L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 )



# 感想など

3人とも、これほどの結果が得られるとは予想していなかった。

「やってみてから考えよう。駄目だったら理由を考える。」

計算をする前にある程度は「理論的考察」はしたが、万全ではなかった。やってみることが大事。

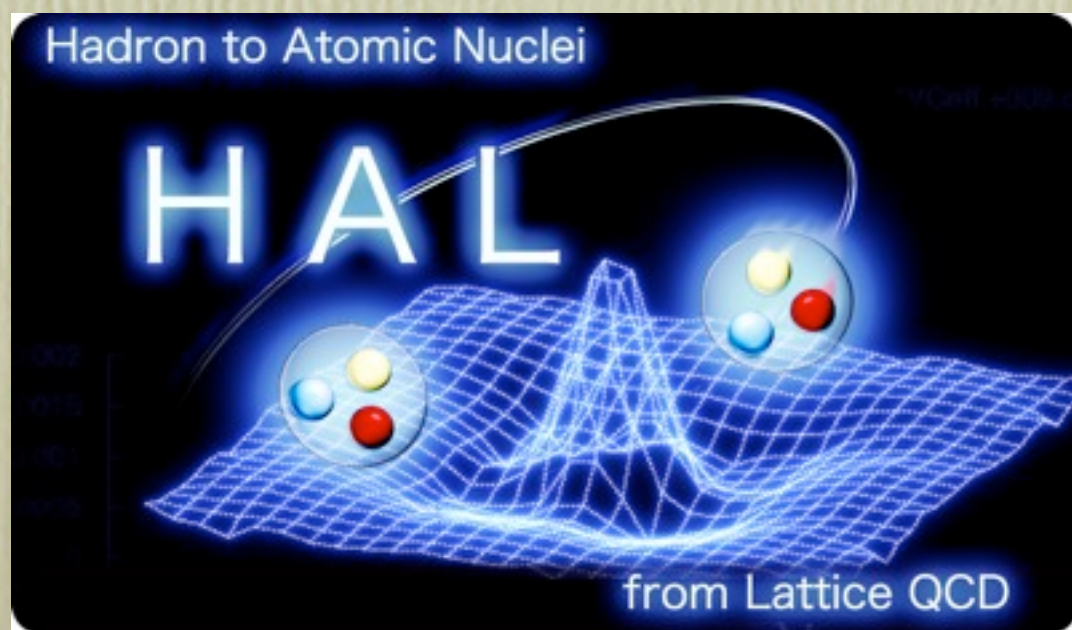
「とくかくやってみよう。」

この結果が偶然であるはずはないので、理論的考察を徹底的に進めたところ、「正しい」ことをやっていたことが分かる。

方法の拡張、計算手法の改良などが進行中。

新たな研究グループを構築。

「幸運の女神には前髪しかない。」



## HAL QCD Collaboration

筑波大：青木慎也、石井理修、根村英克、佐々木健志、山田真徳、

Faisal Etminann

東大：Bruno Charon

理研：初田哲男、土井琢身、村野啓子

東工大：池田陽一

日大：井上貴史



# 反響



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](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、粒子と力の間には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。

○ 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)



○PRLの論文が、**Nature Research Highlights 2007** の自然科学 2 1 論文の 1 つに選ばれる。物理関係はこの論文 1 つで、日本からは他に京大**山中伸弥**氏らのiPS細胞の論文があった。

**“The achievement is both a computational *tour de force* and a triumph for theory.”**

離れ業

2008年1月 青木が初田から「どうも我々の論文がNature Research Highlight 2007 の 1 つに選ばれたらしい。」と聞かされる。

○Progress of Theoretical Physicsに掲載した論文が2011年度の物理学会論文賞の 1 つに選ばれる。

○**2012年度つくば賞**

○**2012年度仁科記念賞**

我々の研究に対する、同僚、共同研究者、家族、その他多くの方の協力や励ましに感謝しています。

核力研究の応用や展開はまだまだこれから。より一層頑張って発展させたい。



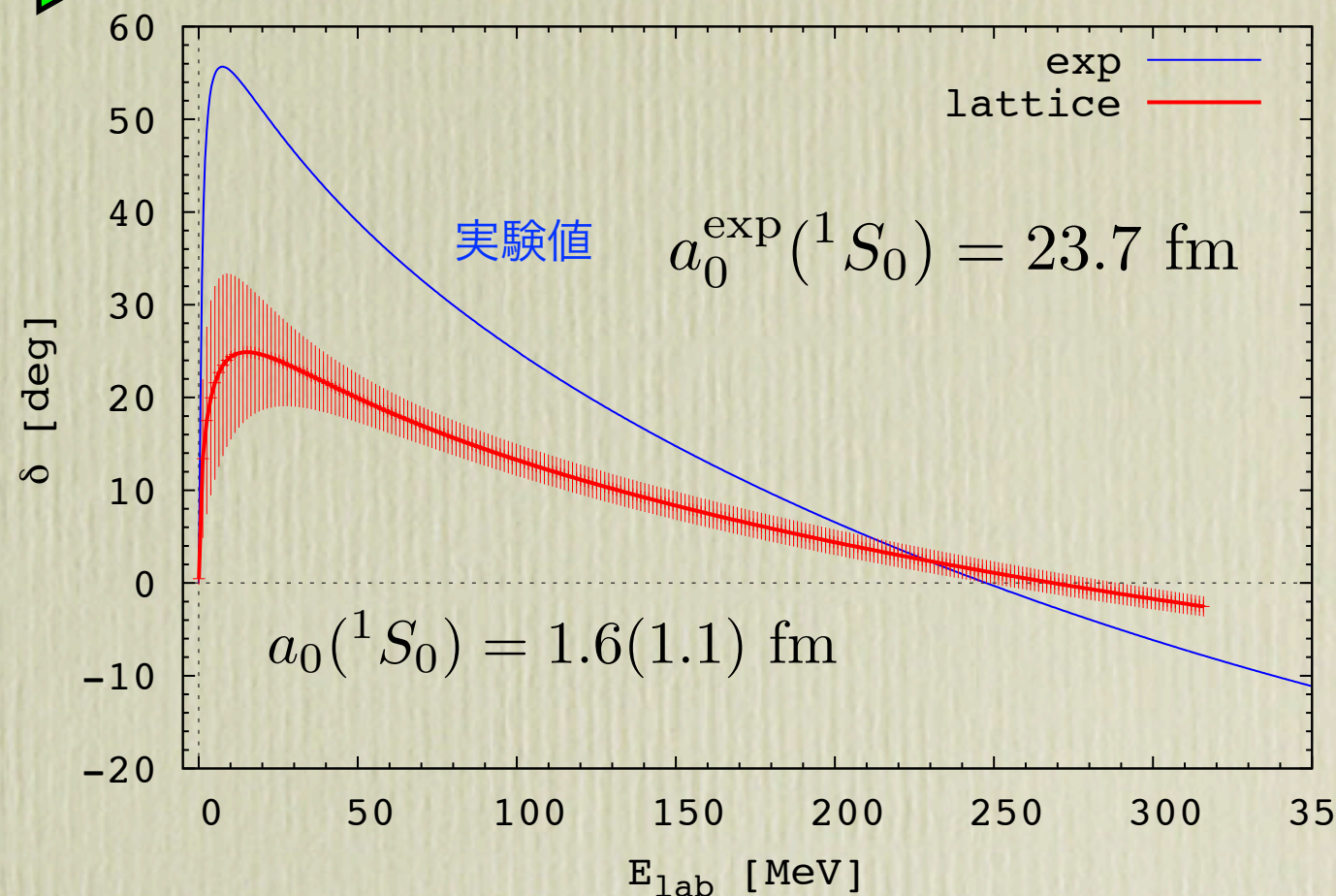
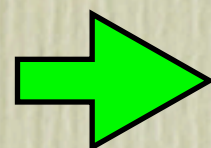
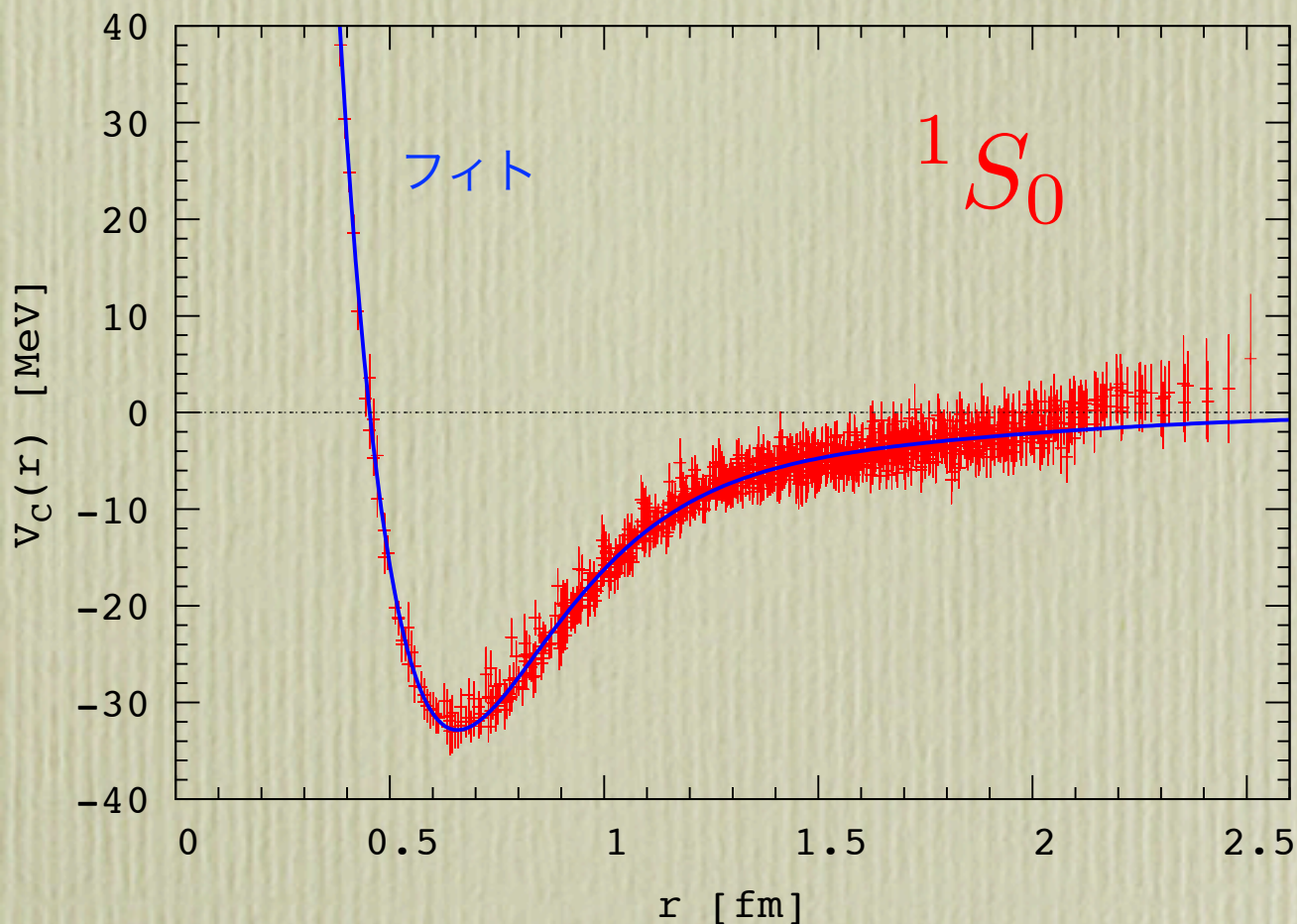
# 最近の結果

u,d,sの3つの力学的なクォークを入れたQCDでの計算

$m_\pi \simeq 700$  MeV

核力ポテンシャル  $k \simeq 0$

散乱位相差



位相差の定性的な振る舞いは実験値と同じ。ただし、クォークが重いため、散乱長などは実験値より小さい。

「京」を用いた物理点（140MeVのパイ中間子の質量を再現するクォーク質量）での計算が重要！



### 3. 進展（宇宙物理への応用）

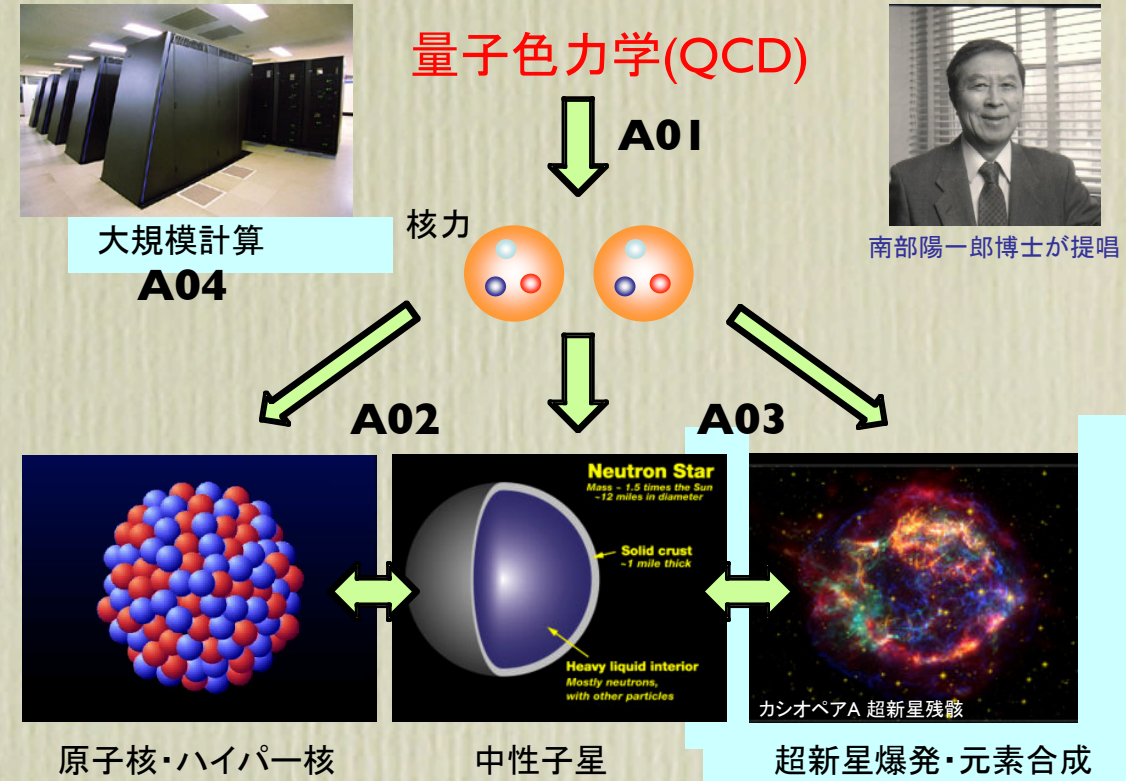


# 素核宇宙連携の活動

新学術領域研究 「素核宇宙連携による計算基礎科学に基づいた重層的物質構造の解明」

2008年度－2012年度（領域代表：青木 慎也）

- A01 「量子色力学にもとづく真空構造とクォーク力学」
- A02 「クォーク力学に基づく原子核構造」
- A03 「クォーク力学・原子核構造に基づく爆発的天体現象と元素合成」
- A04 「分野横断アルゴリズムと計算機シミュレーション」



HPCI戦略プログラム 分野5 「物質と宇宙の起源と構造」

2011年度－2015年度（統括責任者：青木 慎也）

- 課題1. 格子QCDによる物理点でのバリオン間相互作用の決定
- 課題2. 大規模量子多体系による核物性解明とその応用
- 課題3. 超新星爆発およびブラックホール誕生過程の解明
- 課題4. ダークマターの密度ゆらぎから生まれる第1世代天体形成

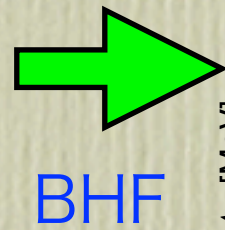
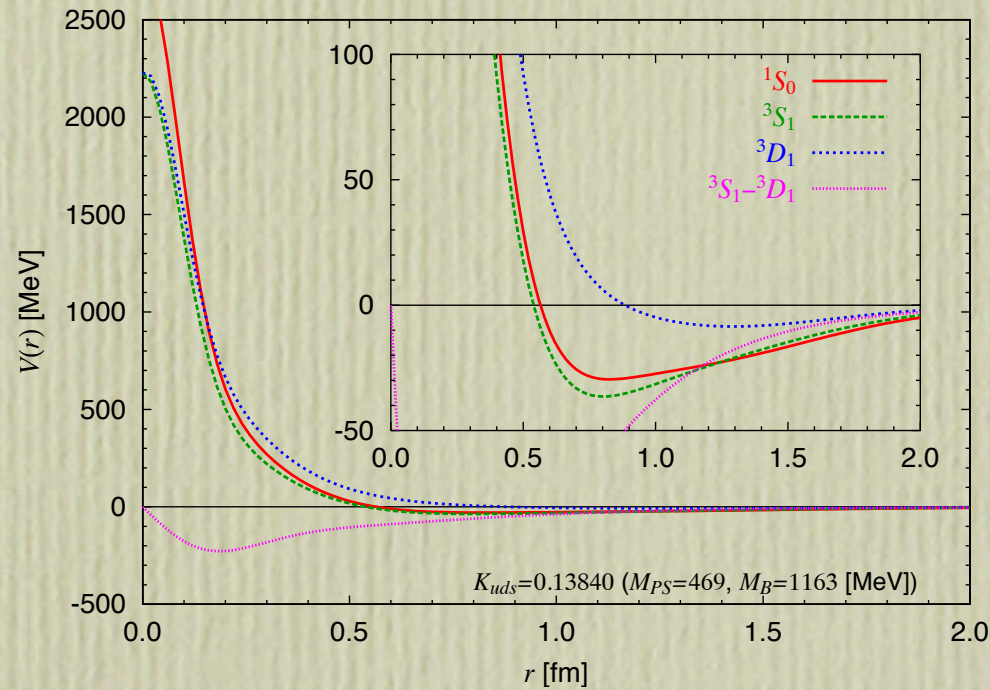




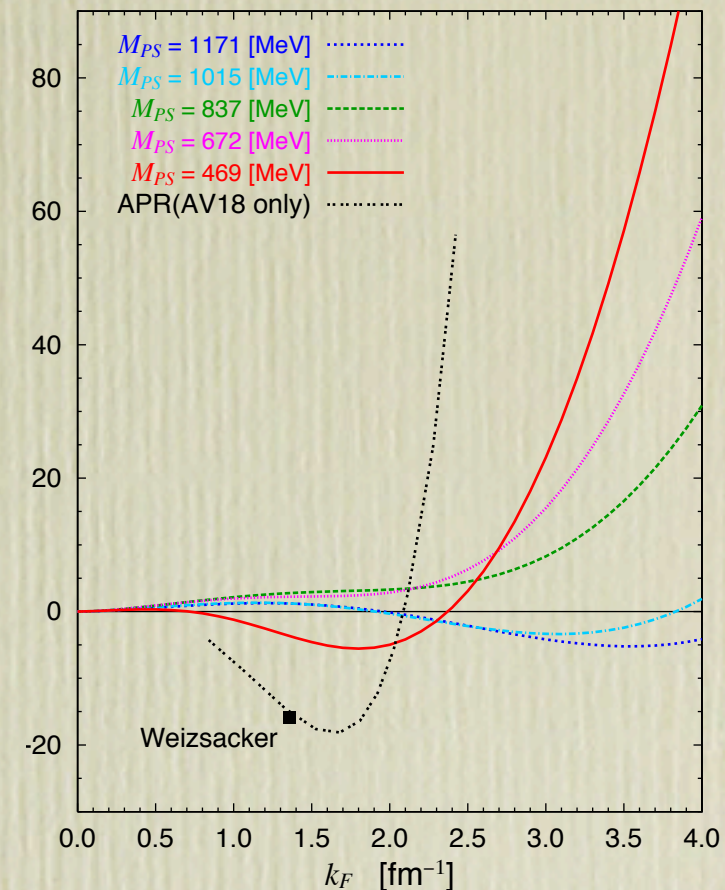
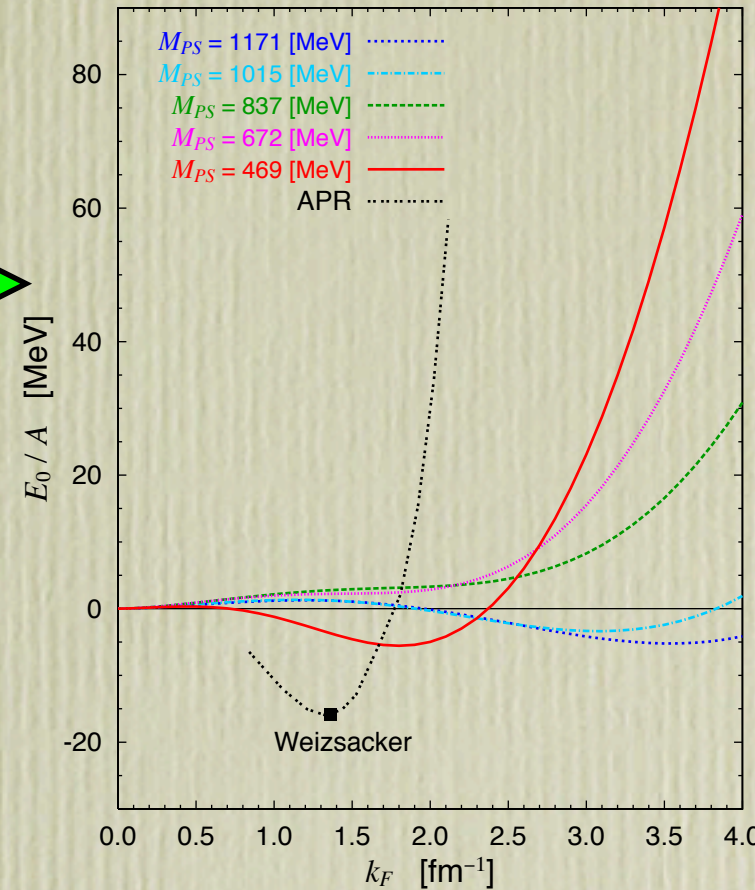
# 核物質や中性子物質の状態方程式

Inoue et al. (HAL QCD Coll.), in preparation

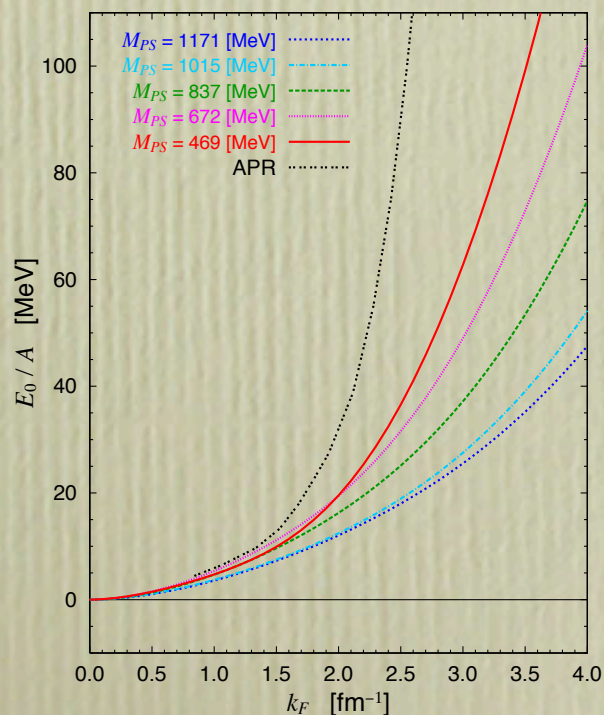
## 核力ポテンシャル $m_\pi = 470$ MeV



## 核物質のエネルギー密度



## 中性子物質のエネルギー密度



フェルミ運動量

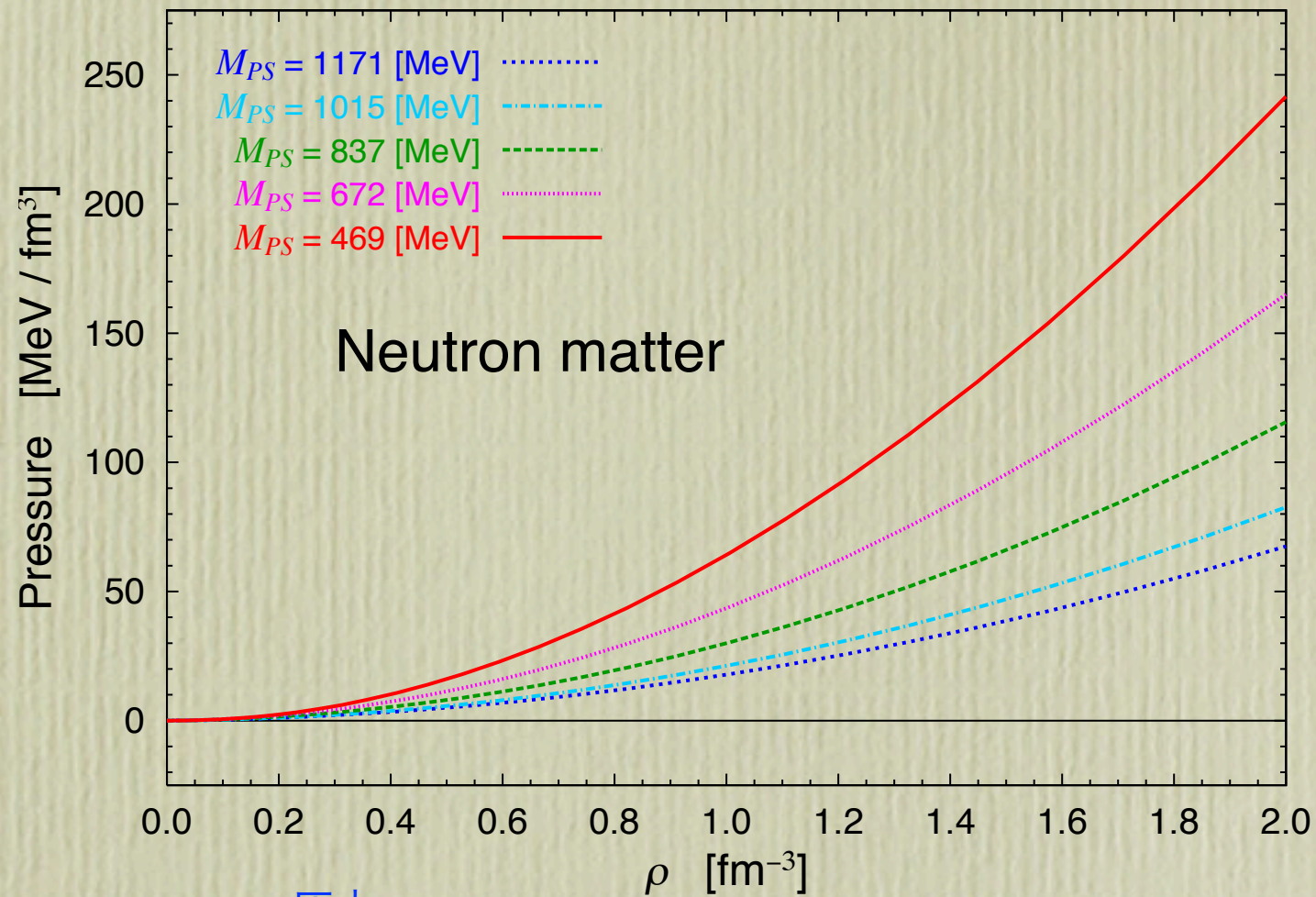
A. Akmal, V.R. Pandharipande, G.G. Ravenhall,  
Phys. Rev. C58 1804 (1998)

核物質は軽いパイ中間子の場合に飽和性を示す。  
ただし、ワイゼッカーの質量公式から決まる飽和点からはずれている。

もちろん、中性子物質は飽和性を示さない。



# 中性子物質の圧力と密度



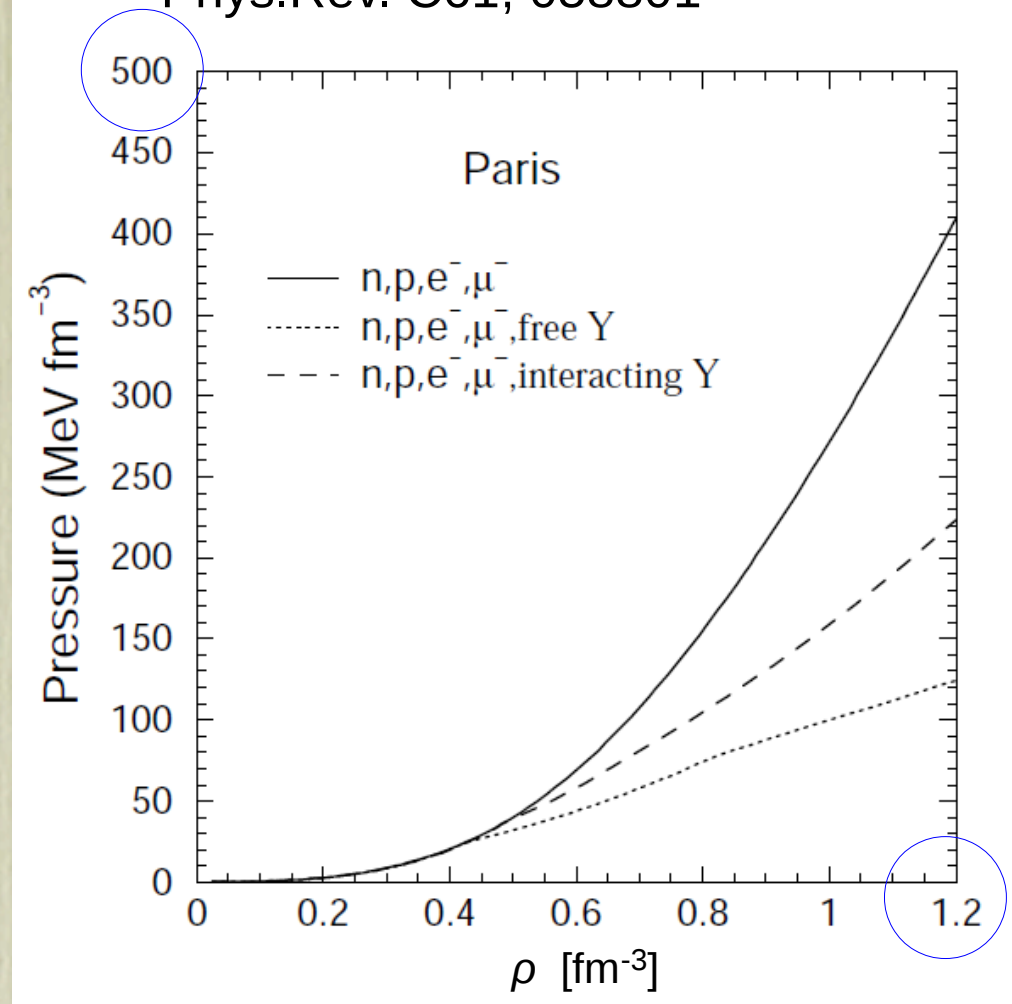
圧力

密度

$$P = \rho^2 \frac{d(E_0/A)}{d\rho} = \frac{\gamma k_F^4}{18\pi^2} \frac{d(E_0/A)}{dk_F}$$

$$\rho = \frac{\gamma k_F^3}{6\pi^2}$$

M. Baldo, F. Burgio, H.-J.Schulze,  
Phys.Rev. C61, 058801

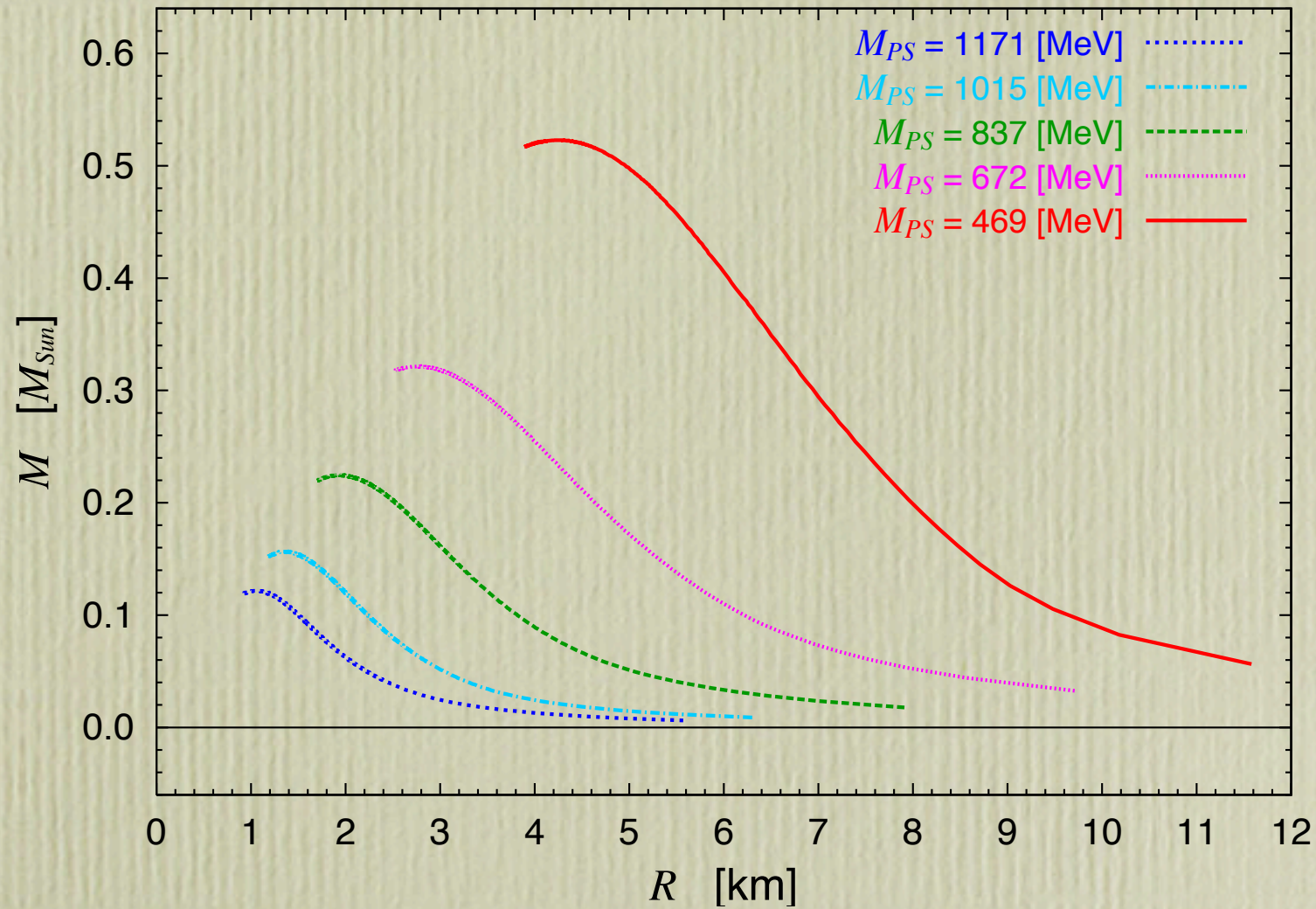


$\pi$  中間子の質量が減るにしたがって、中性子物質がより”硬く”なっていく。  
しかし、現象論的なものより、まだまだ”柔らかい”。



# 中性子星のM-R関係式

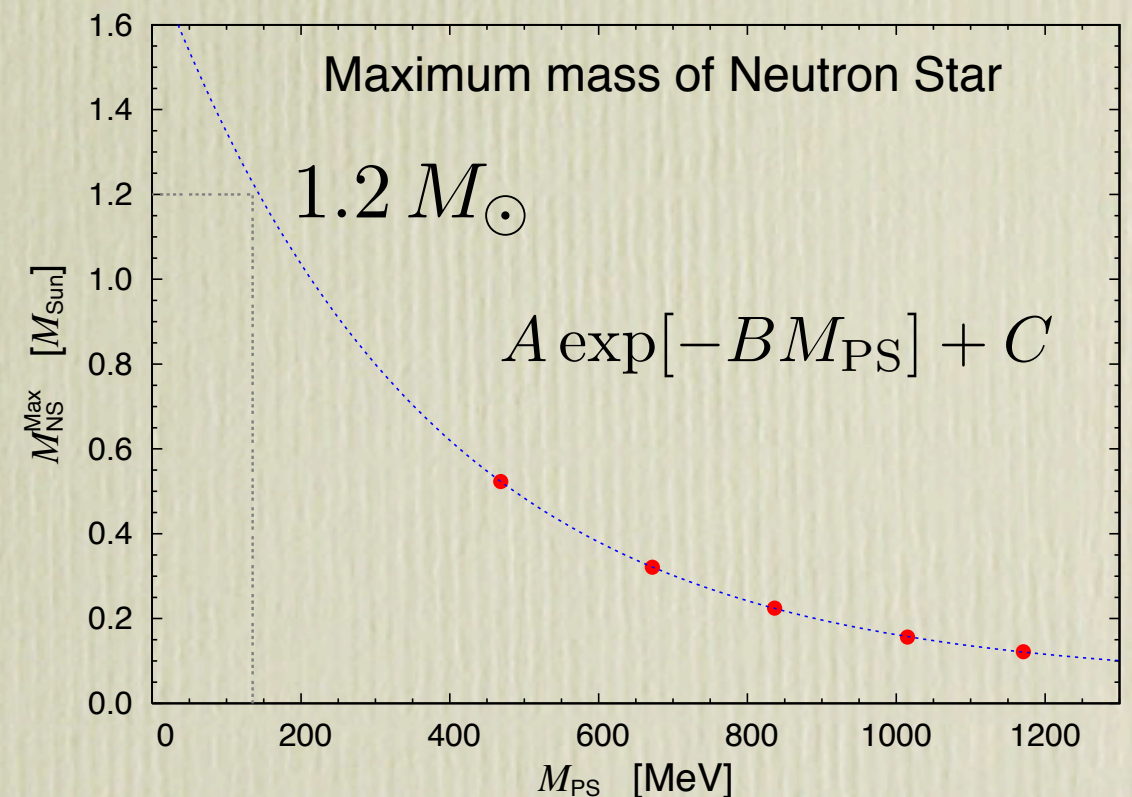
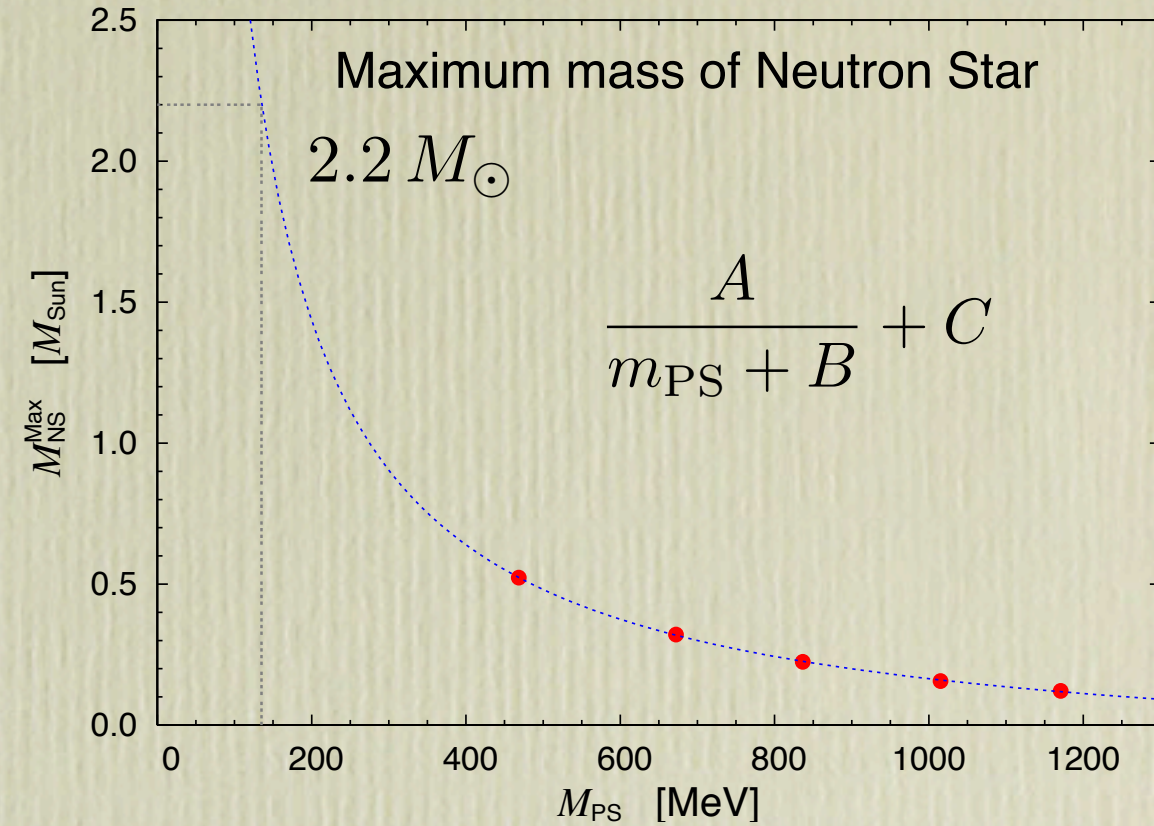
圧力と密度の関係式を使うと、



物理点(135MeVのパイ中間子)では、  
 $(1.2 - 2.2)M_{\odot}$  ?

「京」での計算が重要

中性子星の最大質量 vs.  $\pi$  中間子の質量





## 4. 結論



- 格子QCDによるバリオン間ポテンシャルの計算は非常に有効な新しい方法である。  
(HAL QCDの方法)
- 「京」などにより、物理点（140MeVの $\pi$ ）で大きな体積の格子QCD計算が出来れば、実験の説明だけでなく、いろいろな**予言**が可能になる。特に、宇宙物理学に関連する話題では
  - 物理点での状態方程式
  - ハイペロンを含んだ状態方程式
  - 三体核力、さらに三体バリオン間力の計算、及びそれらを含んだ状態方程式
- クォーク質量を変えると物質や宇宙がどう変わるかが予言可能に！？

## QCD が原子核・宇宙と出会う！

