

第107回 東京大学公開講座
2007年10月13日(土)

～ 湯川秀樹100歳 ～

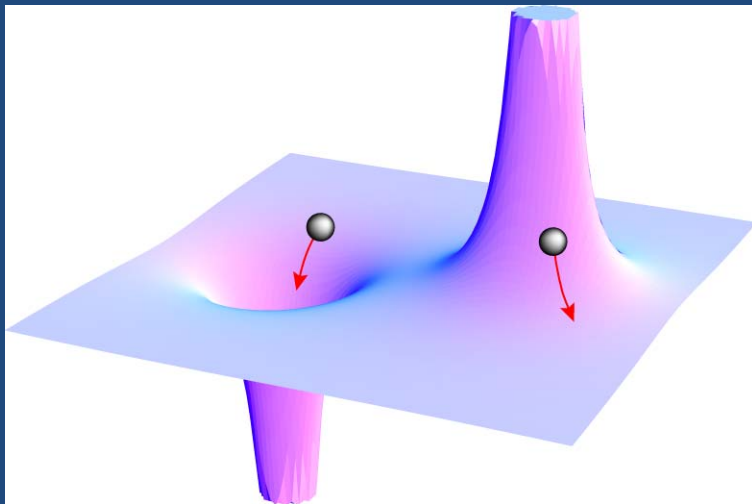
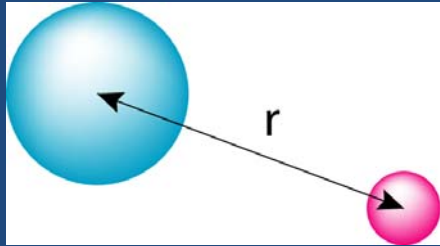
核力100年

理学系研究科物理学専攻
酒井英行

1. <カ>核力 (中間子論)
湯川秀樹とノーベル賞
第23回原子核物理学国際会議
2. 三体核力の検証
3. クォークによる核力の理解
4. 核力研究の展望 (J-PARC と RIBF)

†: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。引用情報のない図版は、講演者の有する著作物の中から引用されたものです。

力<チカラ>とは？



物理では力よりポテンシャルVを使う
(ポテンシャルの傾きが力)

•重力:引力

$$力 = G \frac{mM}{r^2}$$

古典(ニュートン)力学

•電気力:引力/斥力
(符号による)

$$力 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2}$$

電磁気学(マックスウエル)

力は、 r^2 に逆比例

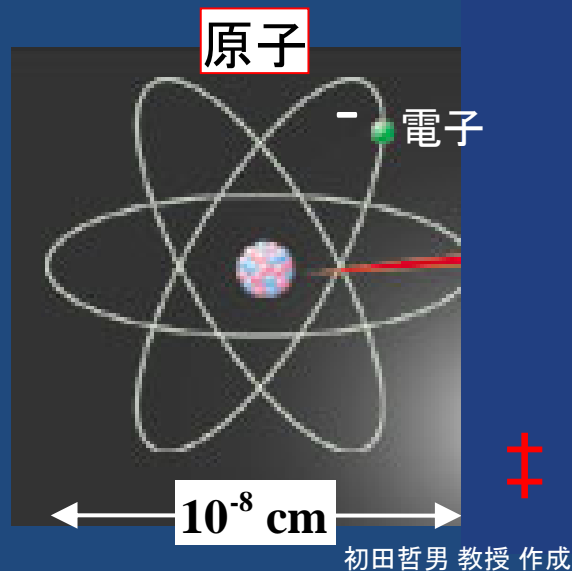
•重力

$$V_G = G \frac{mM}{r}$$

•電気力

$$V_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r}$$

原子核の大きさと重さ(質量)



初田哲男 教授 作成

重さ(質量)

原子の99.97%を占める!

1920年代 量子力学の完成

微小空間に陽子や中性子を閉じ込めておく"力"(核力)の起源は?

- ・ 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: 電気的力より強いが、到達距離は短い
(r^2 に逆比例する力しか知らなかった)

湯川博士のアイデア

1949年ノーベル賞受賞

- ・ 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る
- ・ 到達距離から仮想粒子の質量は陽子と電子の”中間”



http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/kagaku_kag11.html

電氣的力(クーロン力)

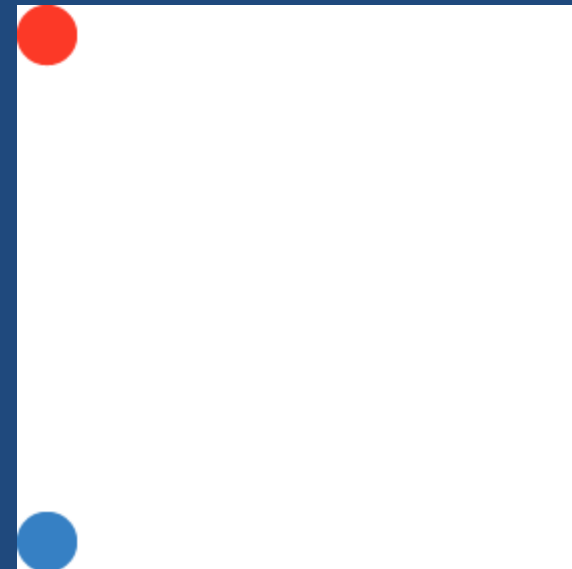
光の交換で力を伝達

核力

パイ中間子の交換で力を伝達

何が画期的か？

新粒子の導入(予言)
強い力(レンジが短い)の起源
量子力学の適用 (相対性理論を満足)



湯川秀樹の論文

Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan, 1935年第17卷48—57ページ

On the Interaction of Elementary Particles. I.

By Hideki YUKAWA.

(Read Nov. 17, 1934)

§ 1. Introduction

At the present stage of the quantum theory little is known about the nature of interaction of elementary particles. Heisenberg considered the interaction of “Platzwechsel” between the neutron and the proton to be of importance to the nuclear structure.⁽¹⁾

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2 \right\} U = 0, \quad (3)$$

$$J(r) = -g^2 \frac{e^{-\lambda r}}{r}, \quad (11)$$

湯川型核力

†

電気力と核力(湯川型)

核力の特徴: 電氣的力より強いが、到達距離は短い

電氣的ポテンシャル

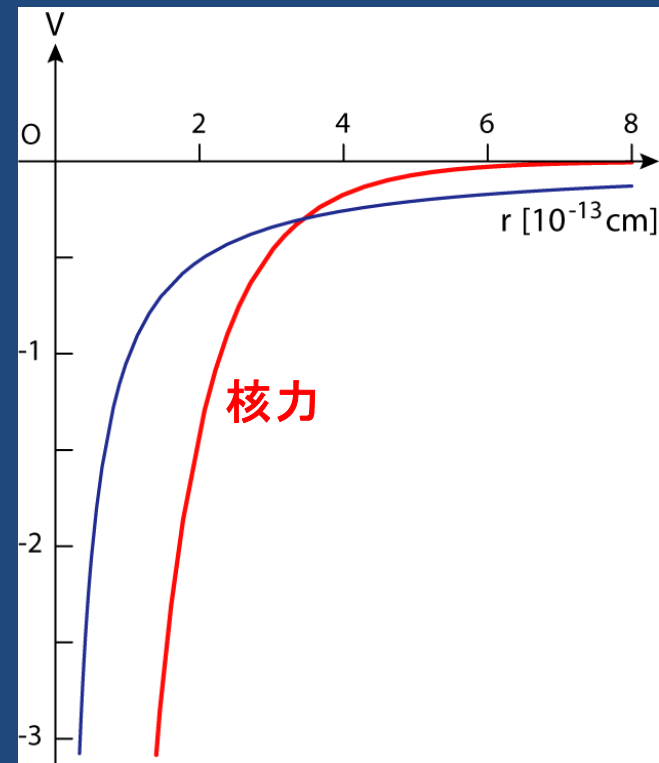
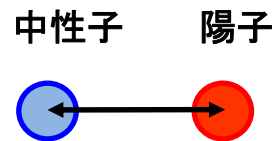
$$V = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

湯川型核力

$$V = -g^2 \frac{e^{-\lambda r}}{r}$$

力とポテンシャル

(ポテンシャルの傾きが力を与える)



湯川秀樹の論文

Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan, 1935年第17巻48—57ページ

On the Interaction of Elementary Particles. I.

By Hideki YUKAWA.

(Read Nov. 17, 1934)

§ 1. Introduction

At the present stage of the quantum theory little is known about the nature of interaction of elementary particles. Heisenberg considered the interaction of “Platzwechsel” between the neutron and the proton to be of importance to the nuclear structure.⁽¹⁾

Assuming $\lambda = 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-1}$, we obtain for m_{π} a value 2×10^3 times as large as the electron mass. As such a quantum with large mass and positive or negative charge has never been found by the experiment, the above theory seems to be on a wrong line. We can show, however, that, in the ordinary nuclear transformation, such a quantum can not be emitted into outer space.

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2 \right\} U = 0, \quad (3)$$

$$J(r) = -g^2 \frac{e^{-\lambda r}}{r}, \quad (11)$$

湯川型核力

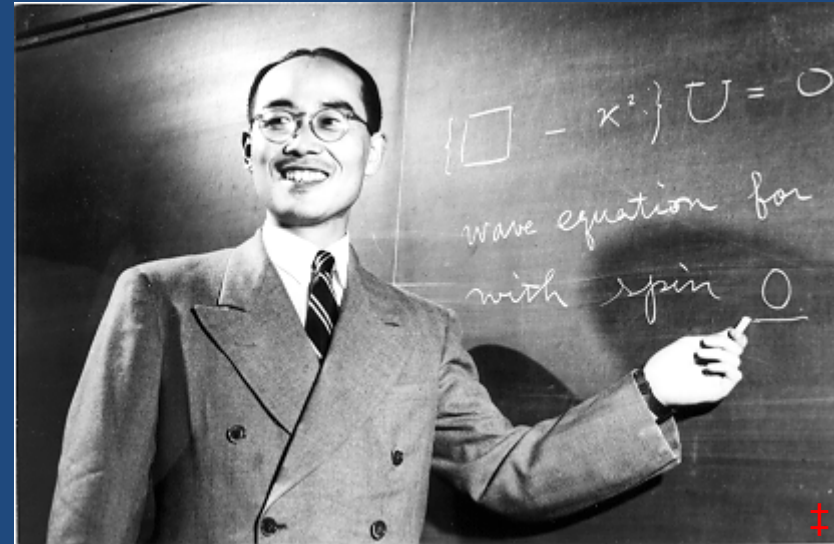


論文は核力とベータ崩壊の説明
新粒子導入 : 強い力+弱い力 統一理論

- 湯川が執筆した最初の論文
- 学位論文
- ノーベル賞

湯川秀樹100歳

- 1907 小川秀樹誕生
- 1929 京都帝国大学卒業
- 1932 湯川スミと結婚
- 1933 大阪大学講師
- 1935 中間子論発表
- 1937 アンダーソンら/仁科ら宇宙線の中に新粒子？（ミュー粒子）
- 1947 パウエルら宇宙線の中に湯川粒子発見（パイ中間子）
- 1949 湯川 ノーベル賞
- 1950 パウエル ノーベル賞
- 1981 死去（74歳）



出典：京都大学基礎物理学研究所

湯川秀樹効果(偉業)

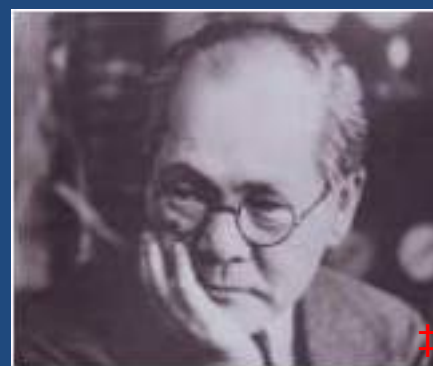
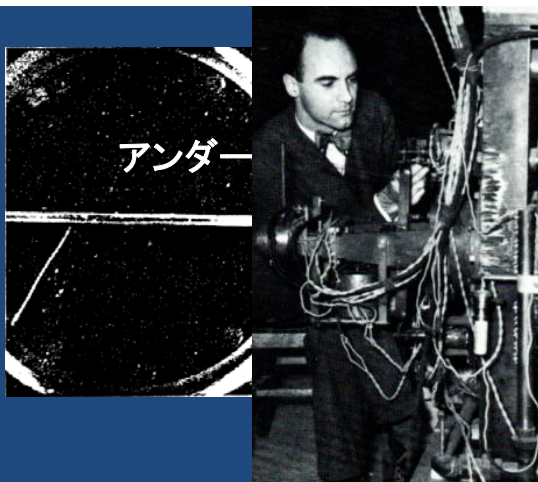
- ・ 今年(2007)は湯川生誕100年
- ・ 核力理論から72年
- 夢と希望を与えた(理論を志す人の増加)
- 基礎物理学研究所の創設(共同利用研)
- 湯川・ラッセル・アインシュタイン宣言
核兵器根絶 平和運動

中間子の発見と日本の核力研究

戦前

1935中間子論発表

1937アンダーソンら/仁科ら宇宙線の中に新粒子？ (ミュー粒子)



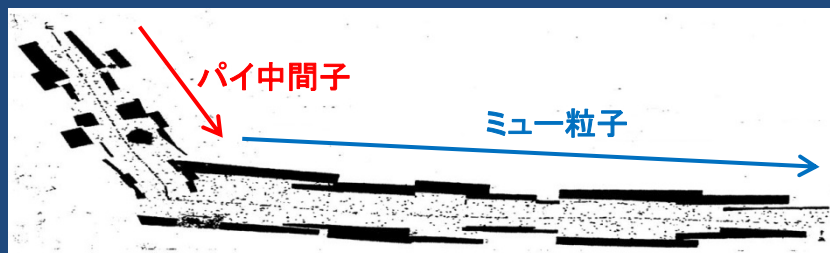
- 理論も実験も世界の最先端にいた！
- サイクロトン加速器 (理研、阪大)

出典：<http://www.jrias.or.jp/index.cfm/8,0,115.html>

戦後

1947パウエルら宇宙線の中に湯川粒子発見(パイ中間子)

1949湯川 ノーベル賞



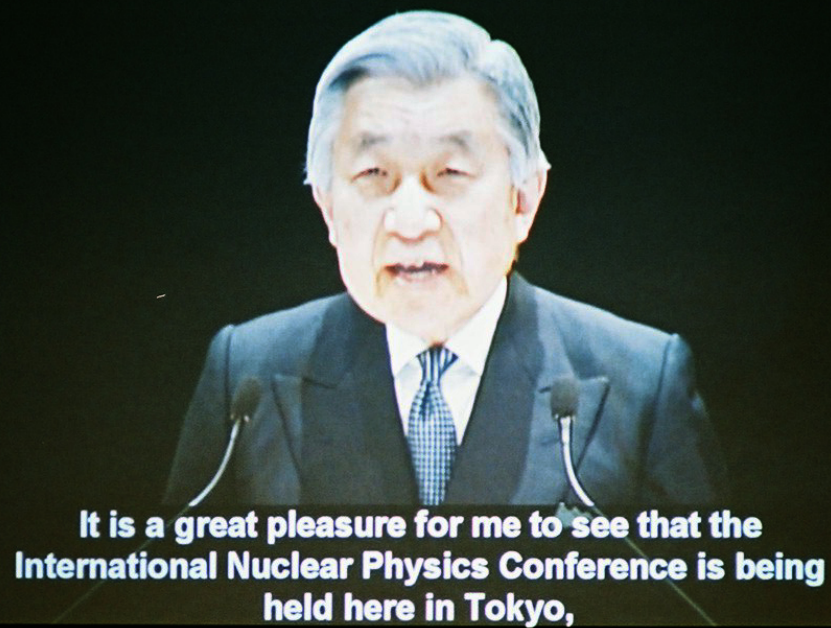
著作権の都合により、下記の図版を削除しました。

セシル・パウエル
写真

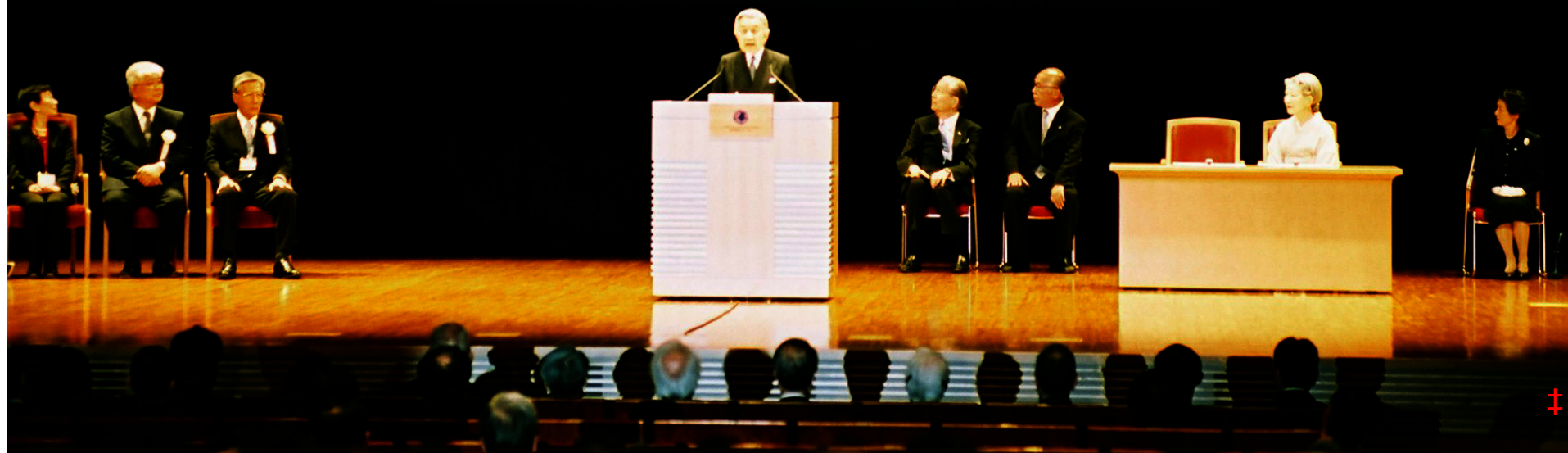
- 理論は湯川効果で活発

- 実験はサイクロトン加速器の廃棄で困難に

その後60年の時を経て
核力研究は.....



It is a great pleasure for me to see that the
International Nuclear Physics Conference is being
held here in Tokyo,



天皇陛下のお言葉

<http://www.kunaicho.go.jp/okotoba/okotoba-h19-01.html#19kokusaikaigi>

この度、原子核物理学国際会議が、国の内外から多数の参加者を得て、東京で開かれることを誠に喜ばしく思います。

原子核物理学国際会議は1951年初めて米国のシカゴにおいて催されました。日本では東京でこれまで2回、1967年と1977年にこの会議が行われましたが、今回は30年振り3回目の開催となります。参加国数は前回の東京の会議より更に5か国多い38か国に及び、世界における原子核物理学の広がりを感じさせます。

本年は、我が国を代表する科学者の一人として大きな足跡を残した湯川秀樹博士の生誕100年に当たり、開会式に先立ち、昨日はその記念講演会も行われました。湯川博士は、1949年物理学の分野でノーベル賞を受賞されましたが、これは、日本人として初めての受賞であり、第二次世界大戦の終結から4年後、我が国がサンフランシスコ平和条約によって独立を回復する3年前のことです。戦争の大きな惨禍を受けた日本人々が、どれほどこの受賞を誇らしく思い、喜んだか、博士の若々しい姿と共に、当時のことが思い起こされます。

原子核物理学の著しい進歩は、基礎科学として、物質の微細な構造に至るまでを明らかにするとともに、その応用面において、エネルギーの創出や医学面での利用を通して、人類社会に非常に役立つ技術の開発に貢献しています。

このような原子核物理学の進歩のために、近年、巨大な研究施設が造られてきておりますが、私どもも、これまでその幾つかを見る機会を得ました。1994年に米国を訪問した際には、カリフォルニア州のスタンフォード大学で、一直線に長く伸びた線型加速器を見ました。国内では、3年前、岐阜県の神岡鉱山の廃鉱を利用したスーパーカミオカンデを見るために、巨大な洞窟(どうくつ)を訪れ、また、昨年秋には理化学研究所で、運転開始前の円形の超伝導リングサイクロトロンを見ることができました。かつて、理化学研究所で、湯川、朝永両ノーベル物理学賞受賞者を育てた仁科芳雄博士が日本で初めて造られたサイクロトロンが、戦後海に沈められたときの仁科博士のお気持ちはいかばかりであったかと察せられます。これらの施設が必要なことは、この分野での国際的な協力が、今後ますます重要となってくることを示していると思われまふ。今回の会議のテーマは、「二十一世紀の原子核物理学の潮流」ということですが、これまでの研究成果を背景に、将来に渡っての国境を越えた協力の一層の可能性が話し合われることを期待しております。

21世紀を展望するに当たり、科学の進歩が明暗をもたらした過去の歴史にも改めて目を向けることが必要に思われまふ。20世紀における物理学の進歩が輝かしいものであった一方で、この同じ分野の研究から、大量破壊兵器が生み出され、多くの犠牲者が出たことは、誠に痛ましいことでありました。1945年夏、広島と長崎に落とされた2発の原子爆弾により、ほぼ20万人がその年の内に亡くなり、その後も長く多くの人々が、放射線障害によって、苦しみの中に亡くなっていきました。今後、このような悲劇が繰り返されることなく、この分野の研究成果が、世界の平和と人類の幸せに役立っていくことを、切に祈るものであります。

原子核物理学と、それに関連する様々な分野の研究者が、国の内外から一堂に会するこの機会に、実り多い討議が行われ、研究者相互の理解が深まり、会議の成果が世界の人々の役立つものとなることを願ひ、開会式に寄せる言葉といたします。

陛下ご自身の強いメッセージが込められている

核力研究の広がり

◆核力の現状

4000以上の実験点を再現するポテンシャル(1990年代に確立)
実用上非常に重要 (現象論的核力)

最近の話題

◆多体系における核力

三体力、核構造(有効相互作用)、エキゾチックな核

◆クォークからの核力の理解

陽子/中性子/中間子などはクォークの複合粒子

核力の現状

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。

近距離: 強い斥力芯

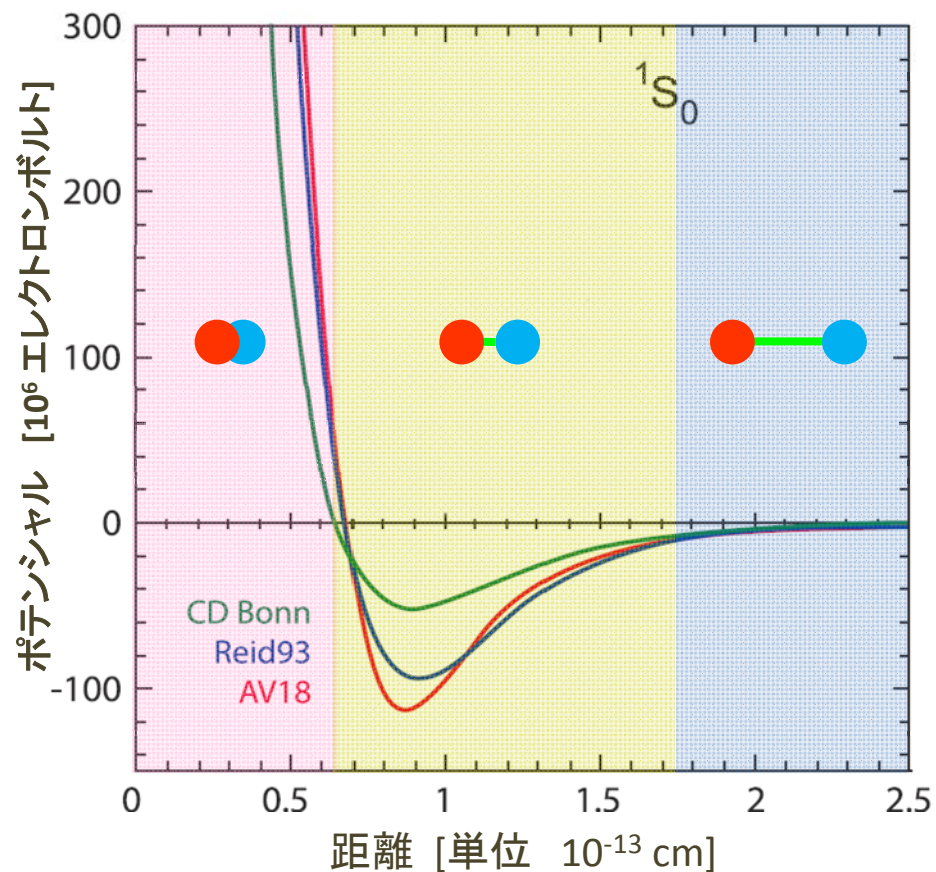
理論的に未解明

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)



陽子・中性子の
半径約10⁻¹³cm

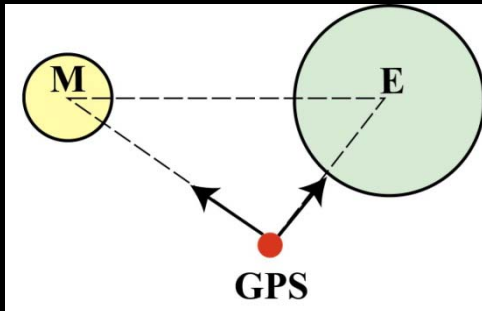
多体系における核力

～ 3体問題と3体核力～

三体力は存在するか？

三体力の解明には、三体問題が解けなければならない。

古典(ニュートン)力学での三体問題



$$H = \frac{P_E^2}{2m_E} + \frac{P_M^2}{2m_M} + \frac{P_G^2}{2m_G} + \frac{Gm_E m_M}{r_{EM}} + \frac{Gm_E m_G}{r_{EG}} + \frac{Gm_M m_G}{r_{MG}}$$

解けない！



クルイリツオーフは作り笑いをしてささやいた
「例の三体問題はどうなりました？」。
「解くのは難しいのかい？」

トルストイ「復活」 1899出版 3章20節から

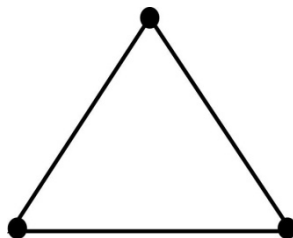
ネフリュードスはなんのことかわからなかったが、それは太陽と月と地球の三体の関係を決定する有名な数学問題のことで、3人の三角関係になぞってクルイリツオーフが説明したのだとパーヴァロヴィナが解説してみせた。

□ 200年前から特解が2つ 知られてた

直線解



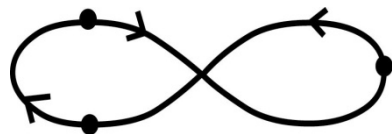
正三角解



三体問題は重要で現在でも盛んに研究されている！

□ 7年前に第3の特解発見される！

Chenciner-Montgomery, Ann. Math. 152(2000)881



著作権の都合により、下記の図版を削除しました。

朝日新聞

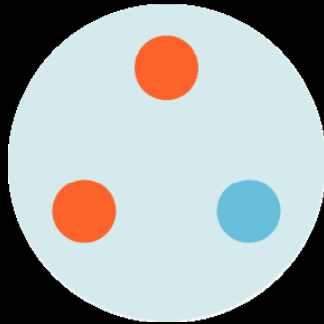
2001年6月13日

「三体問題」記事

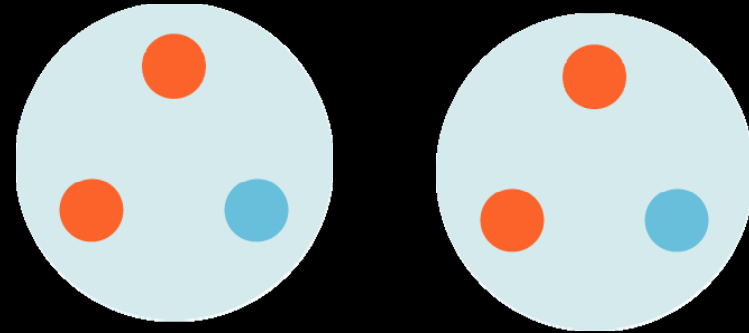
原子核での三体問題と三体力

1957年 藤田純一と宮沢弘成が予言、Prog. Theo. Phys. 17巻360ページ。

二体力



三体力



この当時、実験的な検証は難しかった

- 三体問題を正確に記述する量子力学の方程式を知らなかった。
- 二体力が確立されていなかった。

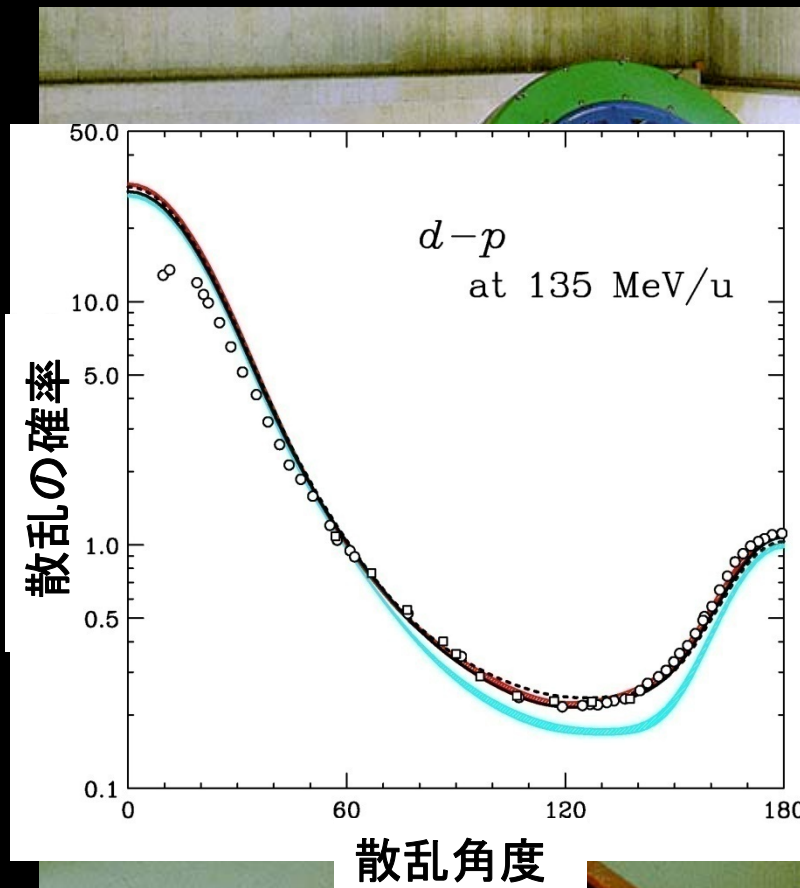
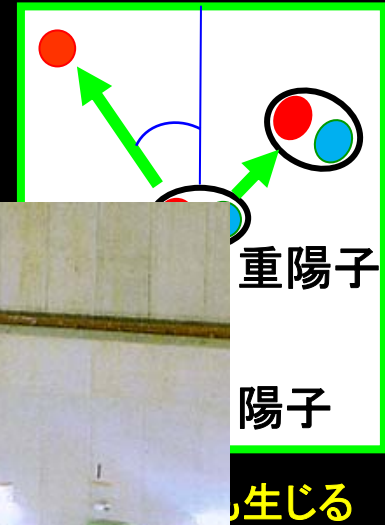
しかし最近になり

- ファデーエフが三体問題を正確に記述する量子力学の方程式を1964年に発見。厳密に解くことができる！
- 現象論的二体力が1990年代に確立。
- 1998年にヴィタラらが散乱実験で三体力検証の可能性を指摘。しかし高精度実験が必要。

散乱実験による三体力の検証

陽子・重陽子弾性散乱の精密測定

比較的に高いエネルギー(光の半分の速度)



ドイツ ボッフムグループの計算

- 二体力
- 二体力+三体力

Sakai et al., PRL 84(2000)5288.

Sekiguchi et al., PRL 95(2005)162301.

三体力の導入で見事に実験データを再現!

1957年 藤田純一と宮沢弘成が三体力を予言、
Prog. Theo. Phys. 17巻360ページ。

今年三体力予言50周年！

国際シンポジウム
「三体力の新局面」(FM50)
～藤田・宮沢三体力から50年～

2007年10月29-31日
小柴ホール

FM50

International Symposium
on New Facet of Three Nucleon Force
50 years of Fujita-Miyazawa Three Nucleon Force

Topics

Review of 3NF study
since Fujita-Miyazawa prediction
3NF effects in three nucleon system
3NF study in effective field theory
3NF effects in hypernuclei
3NF effects in four nucleon system
3NF effects in nuclear structure ($A > 4$)
Related subjects

Speakers include

S. A. Coon (DOE)
A. C. Fonseca (Lisbon)
B. Gibson (LANL)
E. Hiyama (Nara)
N. Kalantar-Nayestanaki (KVI)
H. Kamada (KIT)
St. Kistryn (Cracow)
V. P. Ladygin (JINR)
J. Makino (NAO)
U.-G. Meißner (Bonn, Jülich)
S. Miyashita (Tokyo)
H. Miyazawa (Tokyo)
S. C. Pieper (ANL)
S. Quaglioni (LLNL)
M. R. Robilotta (São Paulo)
T. Takatsuka (Iwate)
H. Witala (Cracow)

Organizers

Y. Akaishi (Nihon, RIKEN)
K. Hatanaka (RCNP)
H. Miyazawa (Tokyo, Honorary member)
T. Motobayashi (RIKEN)
T. Otsuka (Tokyo)
K. Sagara (Kyushu)
H. Sakai (Tokyo, Chair)
K. Sekiguchi (RIKEN, Scientific secretary)
S. Shimoura (CNS, Tokyo)
Y. Suzuki (Niigata)
H. Tamura (Tohoku)

Koshiba Hall
University of Tokyo
October 29-31, 2007

Information
<http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/FM50/>
mail: fm50@nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp



クォークによる核力の理解

斥力芯の重要性

近距離：強い斥力芯

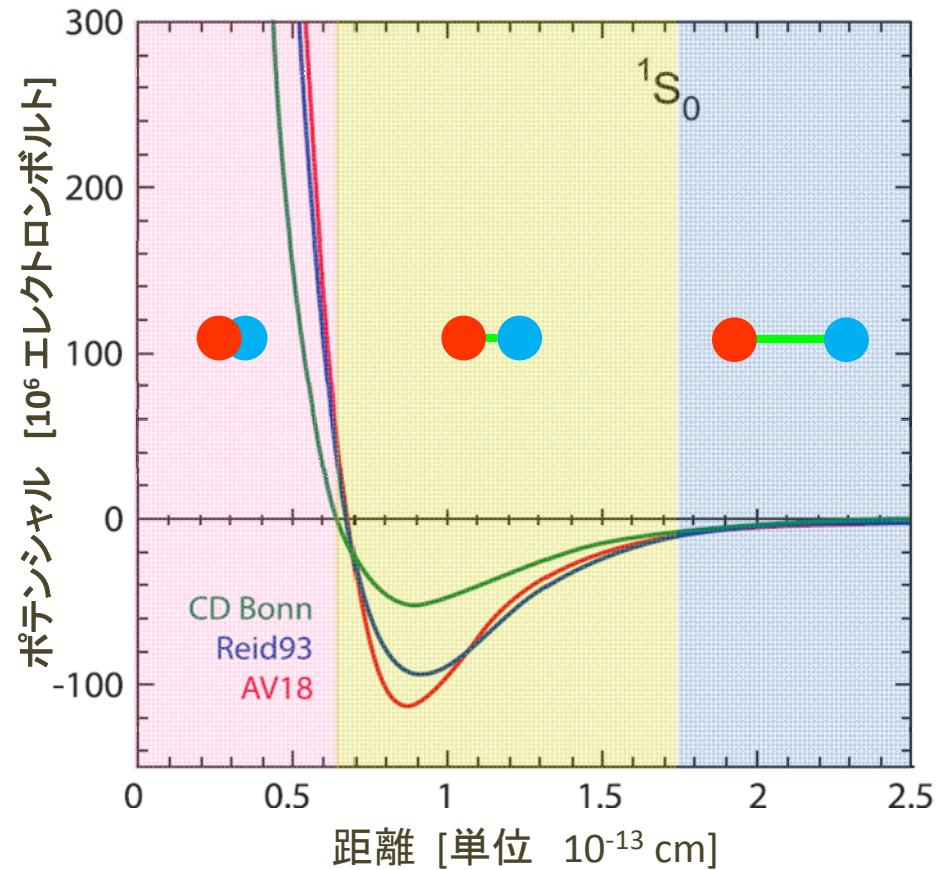
理論的に未解明

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)



陽子・中性子の
半径約10⁻¹³cm

核力芯のクォークによる理解

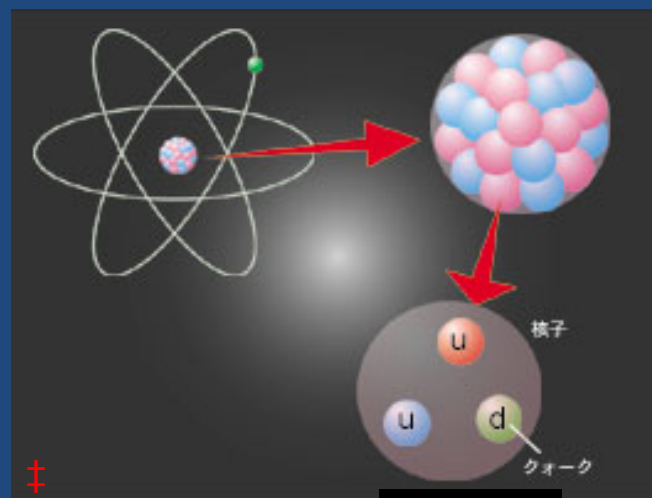
1960年代：陽子/中性子/中間子などはクォークという素粒子からできていることが明らかに



初田哲男 教授 作成

例：陽子 (uud) 中性子 (udd)

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



10^{-13}

cm

初田哲男 教授 作成

量子色力学

クォークとそれを結びつける
糊粒子(グルーオン)の力学

核力を量子色力学(QCD)から導けるか？

これは素粒子・原子核理論における超難問！

難問ついに解決される(4カ月前！)

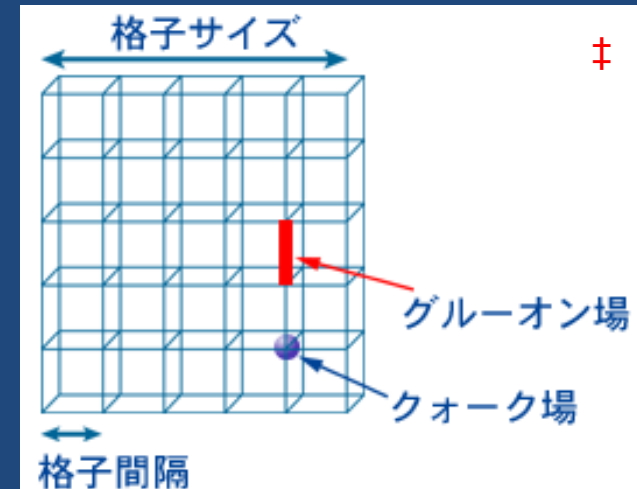
石井、青木、初田 “Nuclear Force from lattice QCD”,
Physical Review Letters, 2007年99巻022001ページ

格子ゲージ理論

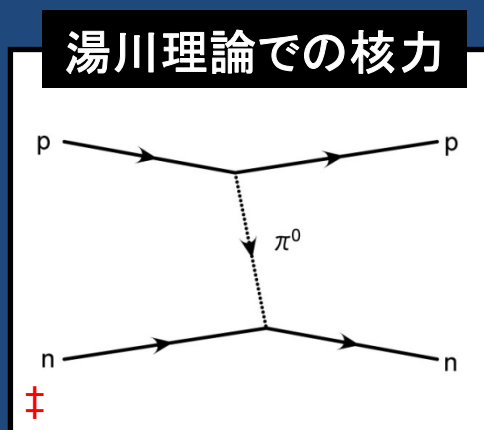
時空格子上での数値シミュレーションにより、
QCDの複雑な計算を実行できる。

新しい計算手法CP-PACSを発明

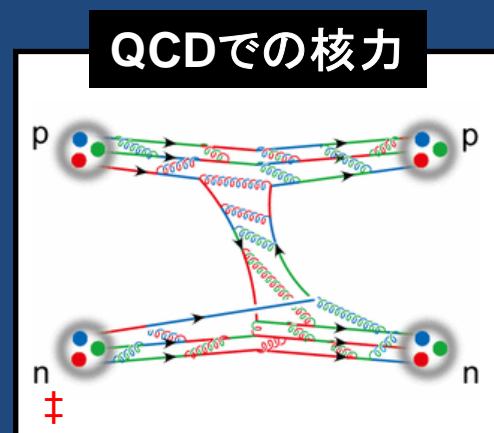
国内最高速計算機(1秒間に約50兆回の演算可能)
4ヶ月間計算



初田哲男 教授 作成

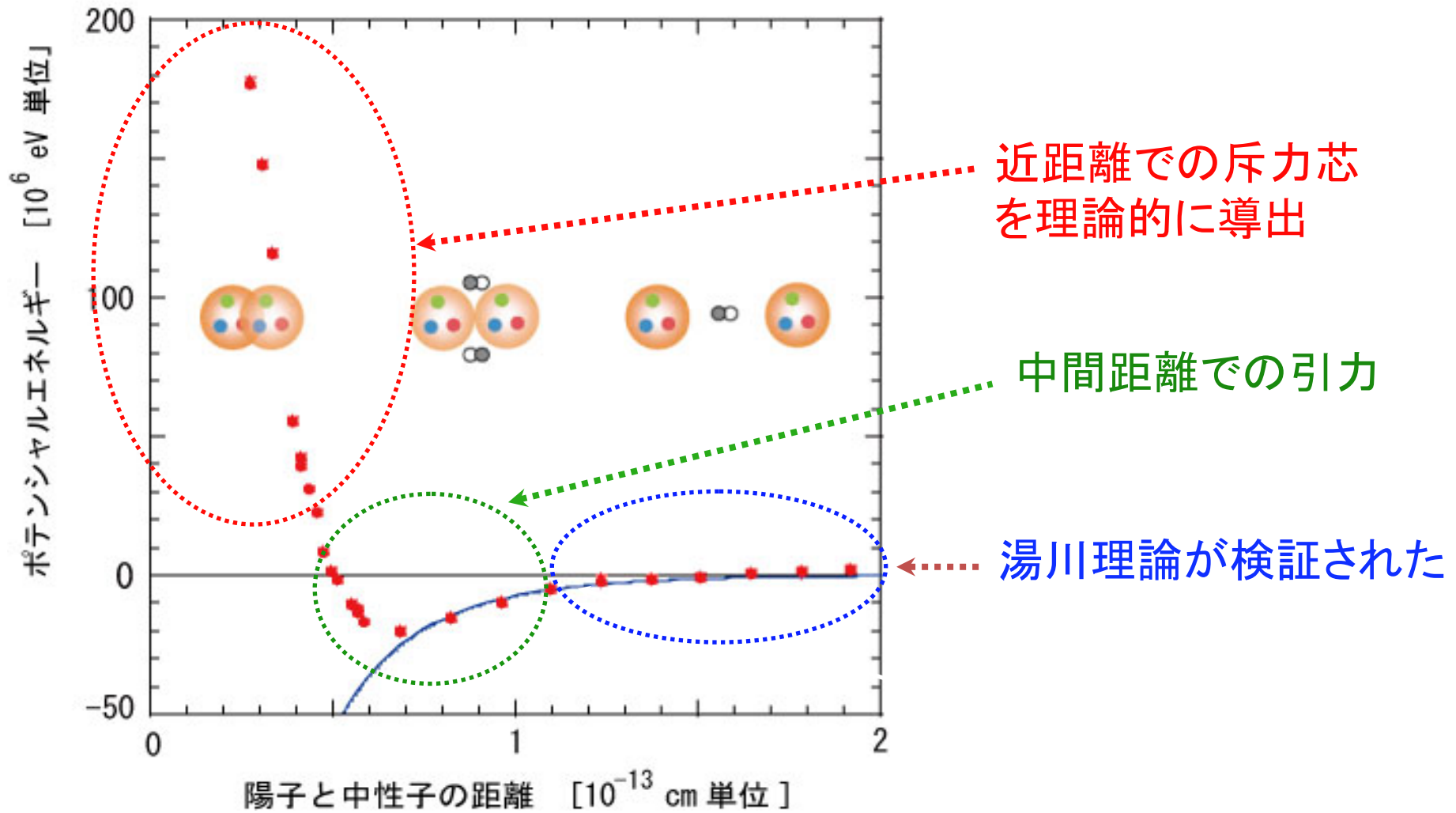


初田哲男 教授 作成



初田哲男 教授 作成

結果の一例



日本の核力研究最先端

世界最強度加速器

二次ビーム利用

●J-PARC (KEK+JAEA)

K中間子ビーム

●RIBF (RIKEN)

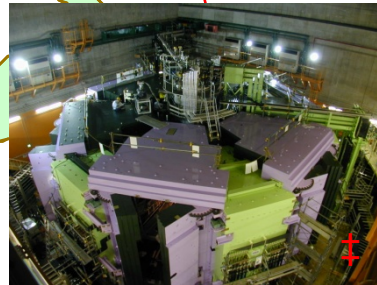
RIビーム(不安定核ビーム)

原子核物理学分野の代表的加速器

<http://soken-pn.kek.jp/jikken/kenkyu/naiyo03.html>



J-PARC 陽子加速器



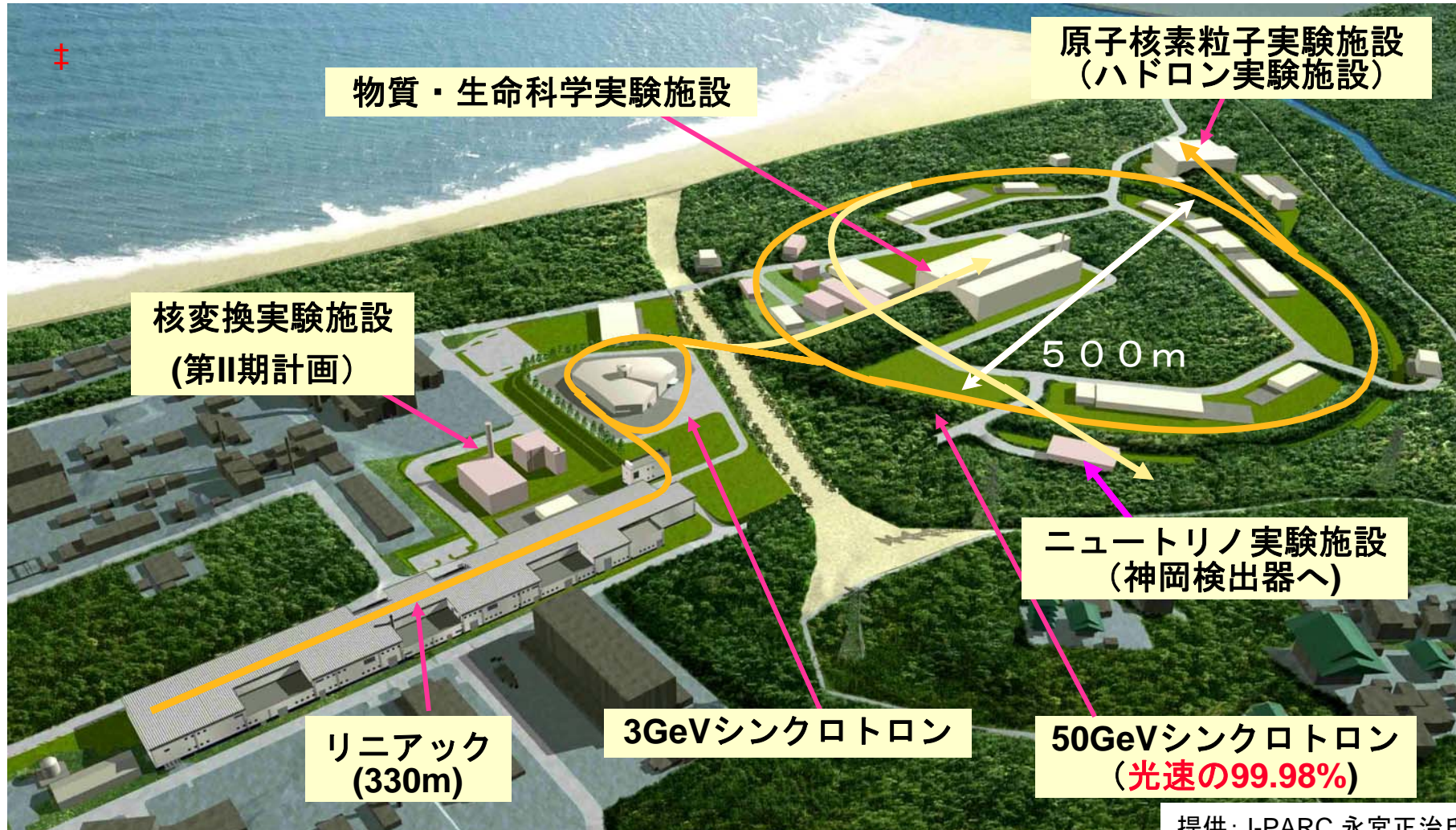
RI-

RI ビームファクトリー

提供: 理化学研究所本林透主任研究員

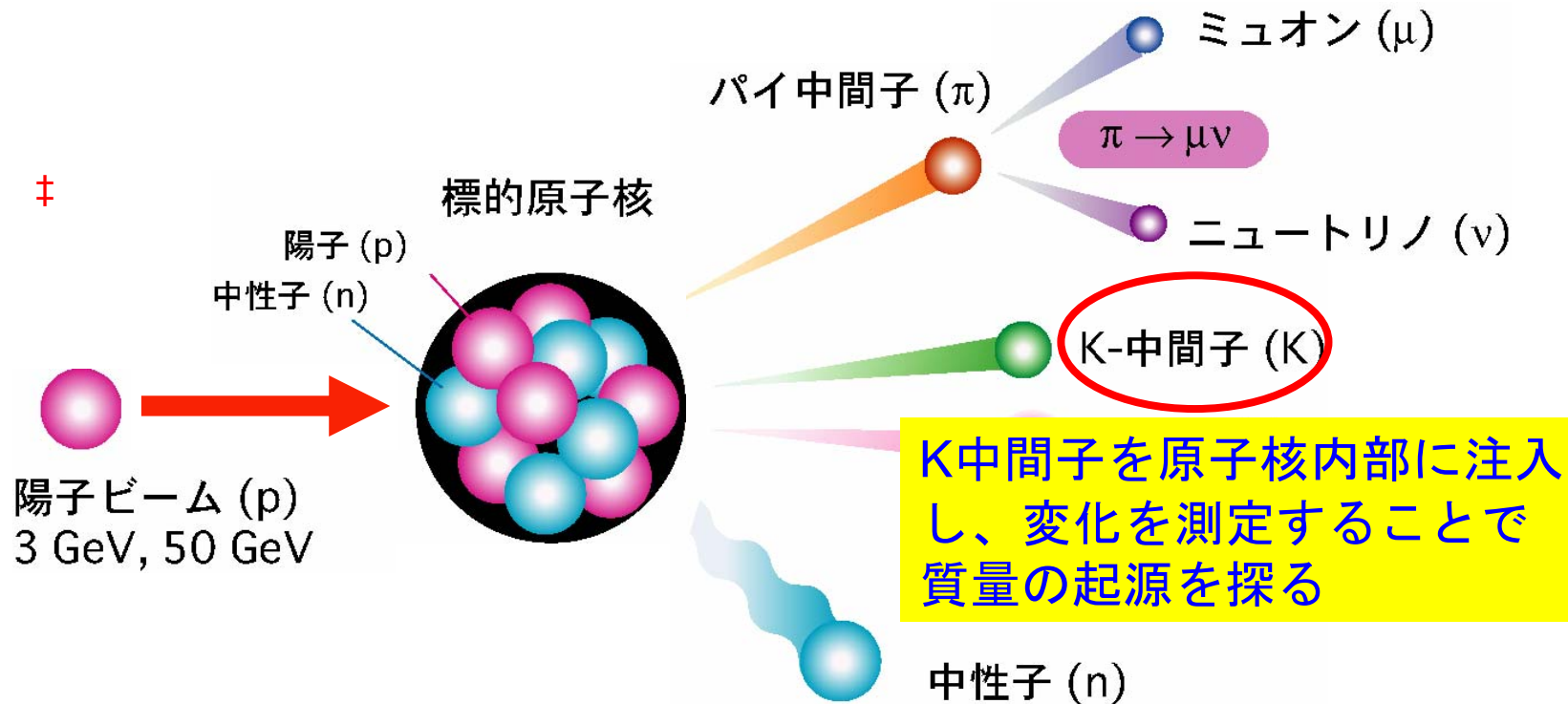


J-PARC 大強度陽子加速器施設 (茨城県東海村)



日本原子力研究開発機構 と高エネルギー加速器研究機構の共同事業、平成20年度完成予定

二次粒子の多目的利用



<http://j-parc.jp/ja/aboutJPARC-j.html>

陽子ビームによる標的原子核破砕から発生する中性子、中間子、ニュートリノなどの二次粒子ビームの多目的利用。

(J-PARCは、平成20年度稼動開始予定)

理研 不安定核ビームファクトリー (RIBF)

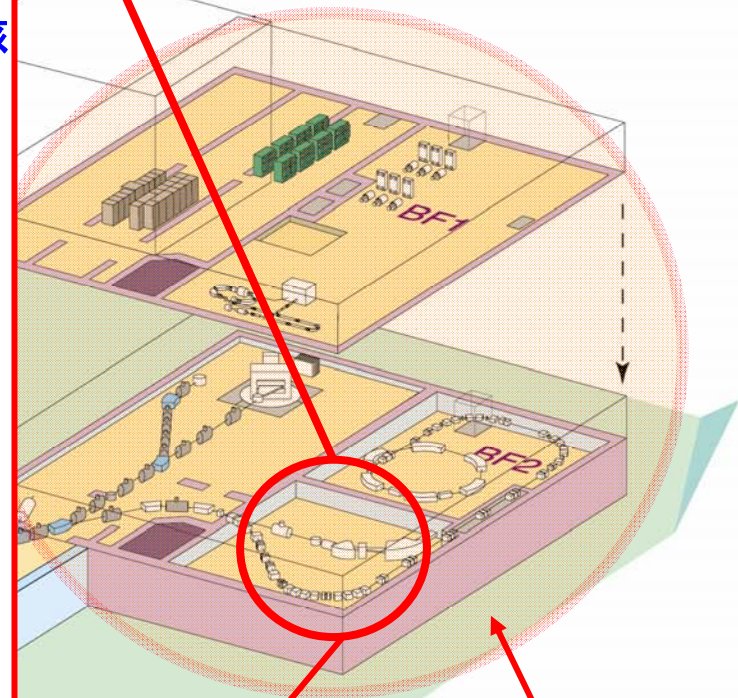


ICHORプロジェクト



ロン装置

不安定核ビーム



S
ムを作る場所

測定器

isotope (放射性アイソトープ) ビーム

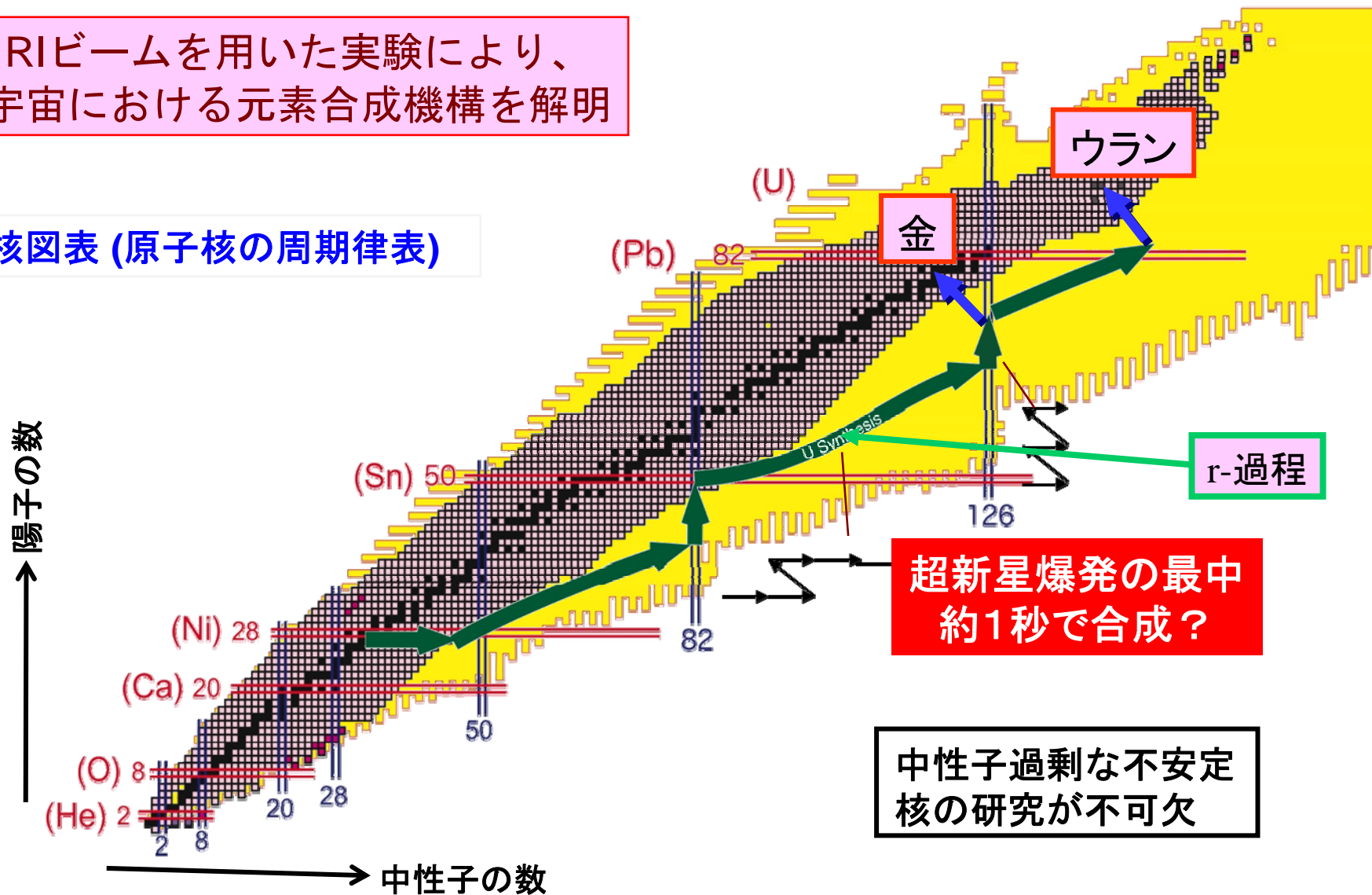
提供: 理化学研究所 本林透氏

元素合成の仕組みの解明



RIビームを用いた実験により、
宇宙における元素合成機構を解明

核図表 (原子核の周期律表)



最後に

未知の世界を探究する人々は
地図を持たない旅人である
湯川秀樹

湯川中間子論

三体核力の検証
(FM50周年)

クォークによる
核力の理解

新たな加速器施設
J-PARC
RIBF

100歳の湯川さんはどんな感想を持つだろうか？

皆さんはどのように思われました？

資料の提供

初田哲男(東大)

永宮正治(J-PARC)

本林透(理研)