



季刊誌

NO. 23

J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX

2026

特集

フェムトの世界

フェムトの世界へようこそ
フェムトの世界は不思議がいっぱい
フェムトの世界の調べ方
フェムトの探求最前線
フェムトの世界の研究者たち

え？
これなに？



フェムトの世界へ

ミクロより
もーっと
もおおーっと
ちっちゃくて
まかふしぎ

虫めがねで
調べる

顕微鏡で
調べる

電子顕微鏡で
調べる

ようこそ

どうやって
調べる？



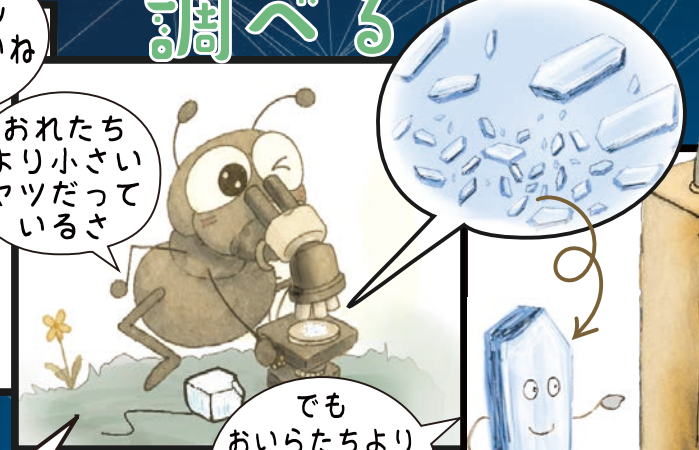
アリさん
ちっちゃいね

おれたち
より小さい
ヤツだっ
ているさ

私たちの
身長は
1メートル
1m

おれたちは
ミリメートル
サイズ
0.001m

ミクロの
世界だね



でも
おいらたちより
もっと小さい
分子ってのも
いるぜ

砂糖の小さい結晶は
マイクロメートル
サイズ
0.0000001m

0.0000000001m

0.000000000001m

砂糖の分子は
ナノメートル
サイズ
0.0000000000001m

0.000000000000001m

0.000000000000000001m



でもね…

砂糖分子を作っている
炭素や酸素の原子は
ピコメートル
サイズ

7オツ7オツ7オ!

うちより
小さい原子核
ってのがいる
んだけど
わかんない
だろ

原子の中にはさらに小さい
フェムトメートル
サイズの原子核があるよ

えええ～
見たい見たい！
どうすれば
いいの？

答えは
次の
ページ！

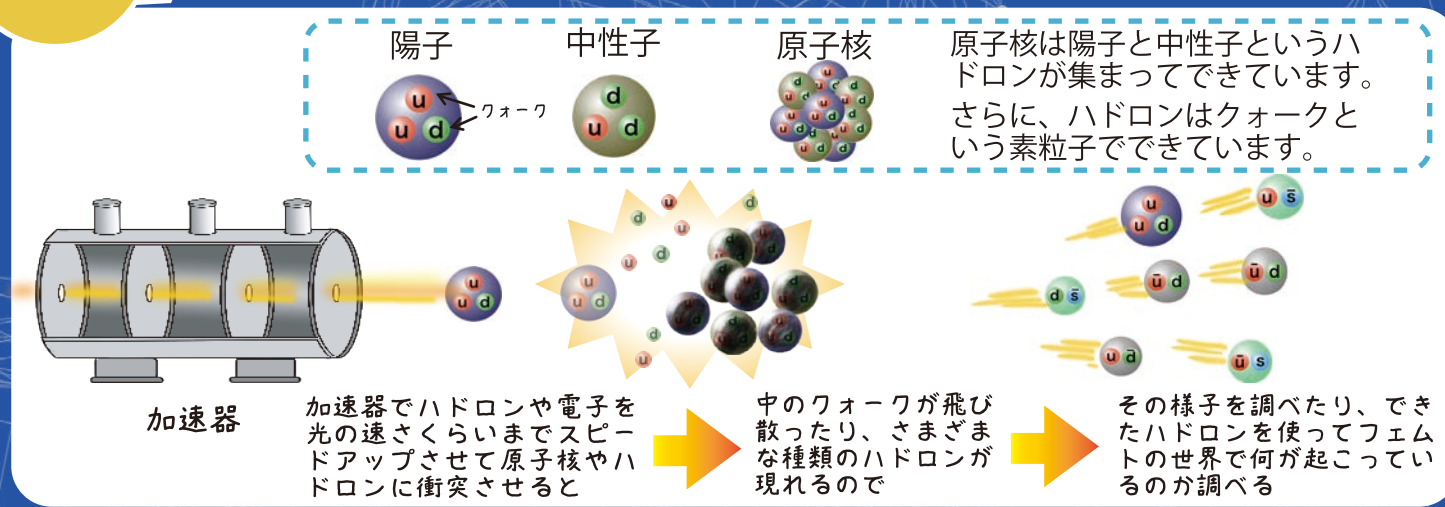
フェムトメートルサイズ
“フェムトの世界”
では信じられない
コトがおこるよ



フェムトの世界では
バドロンが主役

はどろん？

答え 加速器でハドロンを使って調べる



ハドロン大家族の紹介

2種類あるけどみんなハドロン

2個のクォークでできているのがメソン (中間子とも言う)

3個のクォークでできているのがバリオン

ハドロン	メソン	バリオン
π^+ (パイ プラス)	π^- (パイ マイナス)	K^+ (ケー プラス)
K^0 (ケー ゼロ)	$\bar{K}^0$ (ケー ゼロ バー)	Λ (ラムダ)
Σ^+ (シグマ プラス)	Σ^0 (シグマ ゼロ)	Σ^- (シグマ マイナス)
Ξ^0 (グサイ ゼロ)	Ξ^- (グサイ マイナス)	

まだまだいるよ

フェムトの世界は不思議がいっぱい

謎その1 重さの常識が通用しない

バラバラだと軽い

でも合体すると重くなる

クォーク3個がバラバラの時より合体してハドロンになると、なぜか100倍も重くなります。

謎その2 ハドロンのフクザツな力関係

近づきすぎるとケンカする

遠ざかるとさみしがる

あっち行け

やっぱり一緒にいたい

はなれたい

原子核の中では陽子や中性子などのハドロンにはとてもフクザツな力のはたらいているようです。

謎その3 宇宙の謎にまで影響するらしい

中性子星という不思議な星がある

中性子のかたまりなのに、どーやってそんなに大きくなった?

宇宙の謎を調べるとハドロンの性質から説明できそうなことがいろいろ出てきました。

謎その4 なぜか宇宙は物質だらけ

陽子

陽子の反物質「反陽子」

物質と反物質は触れ合うとお互い消えてしまうはずだけど...

宇宙ができた直後、今ある普通の物質とは真逆な性質の反物質が同じだけできたはずですが、そうすると、宇宙は空っぽのぼろぼろなのに、宇宙は物質だらけで反物質はわずかに存在しません。

フェムトの世界の調べ方

①陽子ビームを標的に照射する

J-PARCでは、加速器で陽子ビームを光の速さの99.99%まで加速します。取り出された高エネルギーの陽子ビームをハドロン実験施設へ導いて標的に照射します。

加速器トンネルの様子

空から見た J-PARC

標的(金)

②陽子で大量のハドロンを作る

加速器で光の速さくらいになった陽子が標的の原子核にぶつくと、たくさんのハドロンが現れる

③ハドロンを目的別に分ける

②で作ったハドロンは種類によって電氣的性質や重さが違うので磁石の力や電気の力で曲がり方を換えられます。この性質に着目して、ハドロンを種類別に分けることができます。

分けられたハドロンは、調べたい謎に合わせて実験に使われます。

④二次粒子をぶつけて実験する

たくさんのハドロンを作り、次のような実験をします。

ハドロンを別のハドロンにぶつける

反応の様子からハドロンを支配する力を調べる

K中間子を原子核にぶつける

通常では見られないハドロンを作り

新しいハドロンの状態やハドロンにはたらく力を調べる

中性K中間子 (K^0) が崩壊する時に

非常に稀(まれ)にしか起こらないとされる壊れ方を探す

フェムトの探求最前線

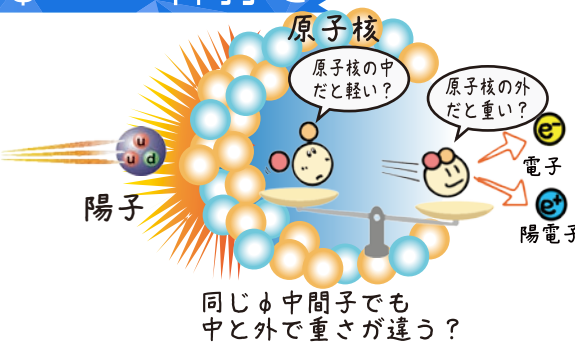
謎解きは
ハドロン
実験施設で！

謎その1 重さの解明はφ(ファイ)中間子で

陽子ビームを原子核にぶつけて
φ(ファイ)中間子を作ります。

原子核のような高密度な物質中
では、中間子の重さが減少する
などの変化が起こると予測され
ています。

原子核の中と外での重さの違い
を調べる実験を進めています。



同じφ中間子でも
中と外で重さが違う？

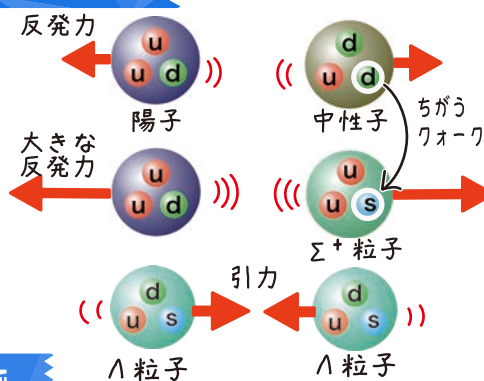


φ中間子の重さを測る大型電磁石

謎その2 フェムトを支配する強い力の解明

ハドロンはクォークでできているので、ハド
ロン間の強い力はクォーク間にはたらく力
をもとに考える必要があります。

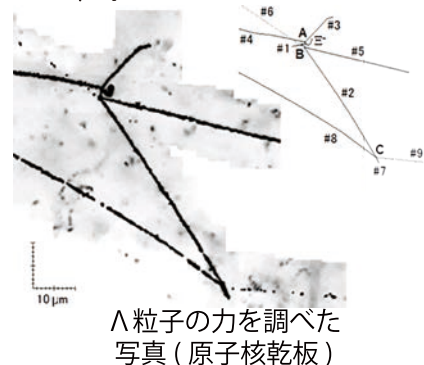
J-PARC では、いろいろなクォークででき
ているハドロンを作って、その間にはたらく力
の違いを観察しています。その結果は、ハド
ロン間の不思議な力を統一的に理解するのに役
立つとわかってきました。



陽子と中性子がとて
も近づくと反発力が
はたらくけど

中性子のクォークが
1個変わってΣ⁺(シ
グマプラス)粒子にな
ったら、その反発力
はかなり大きくなる
ことがわかった！

Λ粒子間にはたらく
強い力は引力だと
判明



Λ粒子の力を調べた
写真(原子核乾板)



核力の詳しい
情報はこちら



原子核乾板の
詳しい情報は
こちら

謎その3 中性子星の謎も強い力で

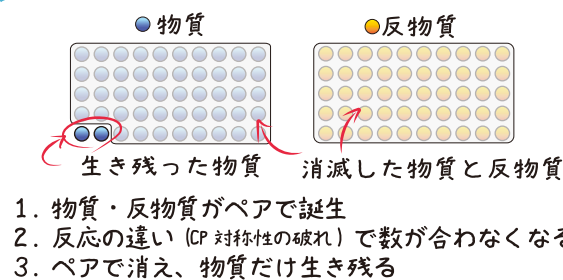
K中間子ビームを用い通常には存在しないs
クォークを含むΛ(ラムダ)粒子を人工的に
作ります。

太陽の100兆倍以上もの密度の中性子星の中
心にはΛ粒子が存在すると言われています。
陽子や中性子に加えてΛ粒子を含む「ミニ中
性子星」とも称される原子核を作り中性子星
の内部物質の解明を行います。

謎その4 物質だらけの解明は大量の中性K中間子で

小林・益川両博士は、物質と
反物質の間にごくわずかな違
い("CP対称性の破れ")があ
ることを説明する理論を提唱
しました。この理論は高エネ
ルギー加速器研究機構・つく
ばキャンパスの実験で検証さ
れ、2008年のノーベル物理学
賞の受賞につながりました。

しかし、小林・益川理論の違
いだけでは実際の宇宙の姿を十分に説明できません。
J-PARC では、世界最高強度の陽子ビームを利用して
大量の中性K中間子(K⁰, K⁰)を生成し、極めて稀(ま
れ)な崩壊パターンを観測することによって物質と反
物質のアンバランスをさらに大きく引き起こすよう
な新たな物理法則の発見を目指しています。

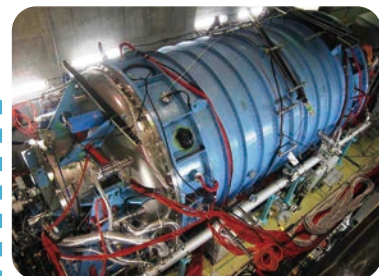


1. 物質・反物質がペアで誕生
2. 反応の違い(CP対称性の破れ)で数が合わなくなる
3. ペアで消え、物質だけ生き残る

実際の宇宙は100億ペアに対して1残った姿
つまり小林・益川理論だけでは足りない！



数百億回に1回だけ
このパターンでこわれる



中性K中間子の崩壊を
捉える測定器(KOTO実験装置)

フェムトの世界の研究者たち

質量の謎案内人 中須賀さとみさん

理化学研究所
仁科加速器科学研究センター

身の回りの物質を構成するハドロンはどのように質量を獲得するのか…
そのメカニズムに迫る実験を行っています。

理論の提唱は実に60年以上も前になりますが、これを検証する実験研究は
いまだに世界各地で続いています。J-PARCでは、原子核内のφ中間子の質量
変化を世界最高感度で測定します。10年以上にわたる測定器開発や、新ビ
ームラインの建設を経て、質量変化を測定するための技術確立しました。

今後数年間のデータ収集で、原子核内で予想されている質量変化を確かな精
度のデータをもとに検証します。質量生成のメカニズムの理解は、強い力の
理解と表裏一体です。J-PARCで提供される様々なビームを活用して、強い力
に基づく物質の成り立ちをより深くシンプルに理解することが究極の目標です。



東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

核力の謎ハンター 藤田真奈美さん



私は「核力の謎」ハンターです。

狙う獲物は、物質をつなぎとめる「強い力」の正体。

陽子や中性子だけでなく、Λ・Σ・Ξ(グザイ)粒子やK中間子を含む特別
な原子核を作り、その振る舞いを手がかりに謎を追っています。
調べてみると、強い力は相手によって引力だったり斥力だったり、その強さ
もさまざま。まるで気まぐれに見えますが、その裏には、すべてを説明でき
るたった一つの「ルール」が隠れているはず。もっと多くの実験データ
という証拠を集め、そのルールを解き明かすことが私の夢です。

物質だらけの謎仕事人 塩見公志さん

高エネルギー加速器研究機構 / J-PARC
素粒子原子核ディビジョン ハドロンセクション

J-PARCで行われているKOTO実験では、中性K中間子が中性のπ中間子と
ニュートリノと反ニュートリノに崩壊する崩壊パターンの探索を行ってい
ます。物質と反物質の僅かな違いがこの崩壊を引き起こすので、その崩壊がど
のくらいの頻度で起こるかを実験的に測定することで、物質と反物質の性質
にどのくらいの違いがあるのかを確かめることができます。

ただ、この崩壊は中性K中間子が300億回崩壊しても1回しか起きないとい
う非常に稀(まれ)な崩壊で、未だに実験的に観測された例はありません。
KOTO実験の最新の結果では、この崩壊が4億回に1回よりは少ない頻度で
しか起きないことを確認できたのですが、まだまだ発見には至らずです。なか
なか実験は大変なのですが、世界初の発見を目指して更なるデータ取得と実験
の改良を行っています。



高エネルギー加速器研究機構 / J-PARC
素粒子原子核ディビジョン ハドロンセクション

研究者たちの元締め 高橋仁さん



フェムトの世界を「見る」には高エネルギーのビームが必要ですが、単にエネ
ルギーが高いだけでは足りません。
カメラで写真を撮るとき、ピントが合っていなかったり光量が足りなかったり
すると何が写っているのか分からなくなります。それと同じように、フェムト
の世界を「くっきりと」見るためにはビームの質と量の両方が必要になります。
質を良くするためにはビームを輸送する装置の整備が不可欠ですし、量を増や
すためにはそれによって発生する熱や放射線への対策も必要です。

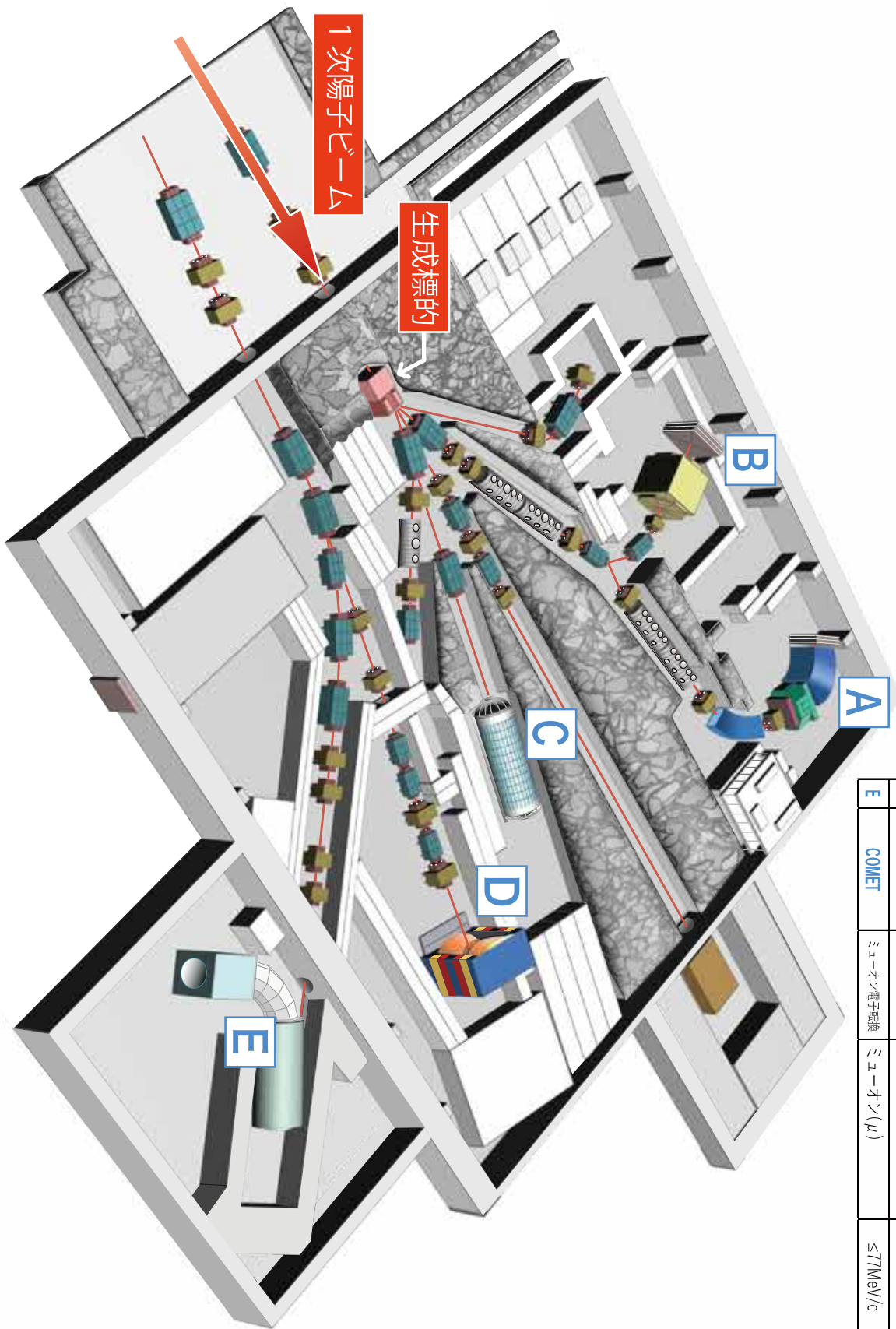
いつの日にか、このハドロン実験施設からノーベル賞級の大発見が生まれる――
そんな夢と誇りを持って、日々施設の運営に携わっています。

表紙：Sクォークを含むK中間子（左端、緑色）が原子核に当たって、K中間子（緑色）が生成し、さらにπ中間子（黄色）が生成する過程を表しています。J-PARCの施設により、この過程の詳しいメカニズムが明らかになりました。これにより、中子星の内部の様子がわかってきました。

ハートロシ実験施設

フェルトの世界の謎を解く多彩なビーム

ビームライン	粒子の種類	運動量	強度
A K1.8	ストレンジネス核物理 ($S = -1, -2$)	π 中間子, K中間子, 反陽子, ... $\leq 2 \text{ GeV}/c$	$\sim 10^6 \text{ K}^+/\text{秒}$
B K1.8BR	ハドロンの物理	π 中間子, K中間子, 反陽子, ... $\leq 1.2 \text{ GeV}/c$	$\sim 10^5 \text{ K}^+/\text{秒}$
C KL	CPの破れ	中性K中間子 $\sim 2 \text{ GeV}/c$	$\sim 10^6 \text{ K}^0/\text{秒}$
D 高運動量 (high-p)	質量の謎 ハドロンの物理	一次陽子(p), π 中間子, ... $\leq 31 \text{ GeV}/c$	$< 10^{10} \text{ p}^+/\text{秒}$ $< 10^7 \text{ } \pi^+/\text{秒}$
E COMET	ミューオン電子転換	ミューオン(μ) $\leq 77 \text{ MeV}/c$	$\sim 10^{11} \text{ } \mu/\text{秒}$



ご意見、ご感想をお待ちしております。 web-staff@j-parc.jp