

第4回 有識者会議後の追加質問

学術的意義や国民及び科学コミュニティの理解

1. 標準理論を超える新しい素粒子現象を発見するという目標であるが、具体的にどのような現象が発見された場合、新しい素粒子現象といえるのか。その際、その発見がどの程度の価値があるといえるのか。建設額や運用額が1兆円を超えると考えられるがそれほどの価値がある学術進展なのか。他分野の研究者にわかるように説明していただきたい。

【回答】

別添資料参照

2. 第2回（令和3年10月14日）資料19ページで、ILCと電子型FCCについて「ヒッグスファクトリーとしての性能は同等であるというコンセンサスができた」と説明されている。その後述べられている「将来拡張性および早期物理成果達成の観点から、ILC+陽子型FCCの組み合わせが世界の素粒子物理にとってベスト」という点においても、世界の研究者コミュニティでコンセンサスが得られているのか。ILCまたは電子型FCCのみという将来像は無く、電子型コライダーに加えて陽子型FCCのようなハドロンコライダーは必須と考えられているということか。

【回答】

（前半）近年の素粒子物理学は、ノイズが少ない観測のできる電子・陽電子衝突型加速器と、より高いエネルギーを比較的容易に実現できる陽子・（反）陽子衝突型加速器の両方を相補的に使い進歩を遂げてきた。これは、既存の現象を電子・陽電子衝突型加速器でより精密に測定することで、新しい素粒子現象の存在するエネルギースケールを予測し、そのエネルギーに到達できる陽子・陽子衝突型加速器で実験を行い、その現象を直接発見するというものである。

このように、電子・陽電子衝突型加速器と、その後続いて陽子・陽子衝突型加速器の組み合わせがベストであるコンセンサスは、世界のコミュニティで得られているが、ILC/Fcc-ee + FCC-hhと限定して、コンセンサスが得られているわけではない。

（後半）（1）の回答のP.2でどの様な発見がILCでなされるかに依存する。

- ILCで第一の道であることが発見された場合：超対称性粒子の発見ラッシュが期待される。この場合、色電荷を持たない超対称性粒子を実際に作って研究するのにILCのエネルギー増強が望ましい。一方、色電荷を持った超対称性粒子は、かなり重くなるため、より高いエネルギーを実現できる陽子型のコライダーが望ましくなる。
- ILCで第二の道であることが発見された場合：クォークやレプトンより小さな階層の素粒子構造を発見するための加速器が必要になってくる。この次の階層のエネルギースケールが不明であるため、新しい加速器の技術も含めて未定である。比較的低い場合は、ILCのエネルギー増強で対応可能であるが、高い場合は、高エネルギーを実現できる陽子衝突型や新しい技術が必要になる。
- 第三の道である場合：そもそも次のスケールがプランクスケールなど極めて高いため加速器でボトムアップで研究する方法ではなくなる。

3. 一般向けへの説明（特に提案研究者が建設候補地としている地域での説明）のリスト（開催日時、テーマ、参加者数、対応者、参加制限の有無）を示していただきたい。

【回答】

候補地における住民説明会

日時	場所	内容	対象	参加者	説明者（敬称略）
2018.9.24	一関市保健センター	・ ILCの概要（10分） 東北ILC準備室 ・ 岩手県の取組（10分） 岩手県 ・ ILCの安全対策（20分） KEK ・ 質疑応答（50分）	一般 （制限なし）	140名	岩手県：佐々木、岩手大 成田
2019.3.17	一関市大原 市民センター		一般 （制限なし）	110名	岩手県：佐々木、KEK：道園、照沼、佐波、岩手大：成田
2019.10.5	奥州市江刺総合支所 奥州市前沢 ふれあいセンター 一関市川崎 市民センター 大船渡市シーパル		一般 （制限なし）	44名	岩手県：高橋、KEK：道園、照沼、佐波、東京大：山下、岩手大：成田、吉岡
2019.12.22	大船渡 一関市生涯学習 ふれあいセンター 一関市東山 地域交流センター 奥州市水沢 地区センター		一般 （制限なし）	25名	岩手県：高橋、KEK：道園、照沼、佐波、岩手大：成田、吉岡
2020.1.19	一関市奥玉 市民センター		一般 （制限なし）	74名	岩手県：高橋、KEK：道園、照沼、佐波、岩手大：成田、吉岡
2020.2.2			一般 （制限なし）	61名	岩手県：高橋、KEK：道園、照沼、佐波、岩手大：成田、吉岡
			一般 （制限なし）	50名	岩手県：高橋、KEK：道園、照沼、佐波、岩手大：成田、吉岡
			一般 （制限なし）	45名	岩手県：高橋、KEK：道園、照沼、佐波、岩手大：成田、吉岡、東北大：佐貫
			一般 （制限なし）	22名	岩手県：高橋、KEK：道園、照沼、佐波、岩手大：成田、吉岡（一関会場のみ参加）、東北大：佐貫
			一般 （制限なし）	77名	岩手県：高橋、KEK：道園、照沼、佐波、岩手大：成田、吉岡（一関会場のみ参加）、東北大：佐貫

候補地における広報活動

年度	内容	テーマ	対象	参加者	説明者
2016~2020	出前授業 （46回）	ILC全般 （放射線含む）	小中高生・ 一般	3170名	KEK 職員
2016~2020	一般向けイベント （12回）	ILC全般 （放射線含む）	小中高生・ 一般	14232名	KEK 職員

候補地以外の広報活動

年度	内容	テーマ	対象	参加者	説明者
2016~2020	出前授業 （7回）	ILC全般 （放射線含む）	小中高生・ 一般	454名	KEK 職員
2016~2020	一般向けイベント （27回）	ILC全般 （放射線含む）	小中高生・ 一般	1832786名	KEK 職員
2016~2020	オンラインイベント （4回）	ILCの物理	高校生・ 一般	43202名	IDT村山

表の左側は、安全説明会であり、地域の住民に説明を行ってきた。制限を設けずに、現地で一時間以上の説明会を行ってきた。放射線の心配がないことや地震の対策など理解が進んでいる。

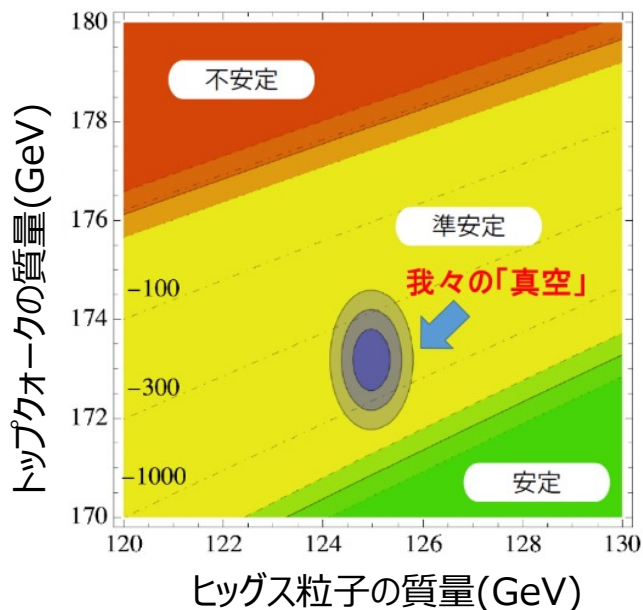
表の右上側は、現地での講演会や出前授業などの広報活動であり、多数の参加者が得られており、地元の高い期待が表れている。

表の右下側は、現地以外の方法活動である。のべ19万人程度の参加者が、ILC単独のセミナーなどに参加している（第3回有識者会議資料参照） 右下表2つ目の参加人数が多いのは、ILC単独ではなく、ILCも参加した六本木での芸術祭の参加人数を加えてあるからである。

[1] 新現象の捉え方と 発見の学術的意味

- (1)新現象の示唆？ 新しい次元について
- (2)第3の道 マルチバース？
- (3)暗黒物質の解明

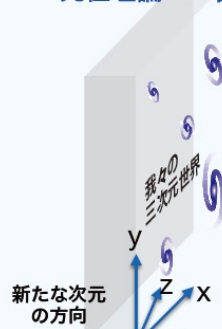
(1) 新現象の示唆？



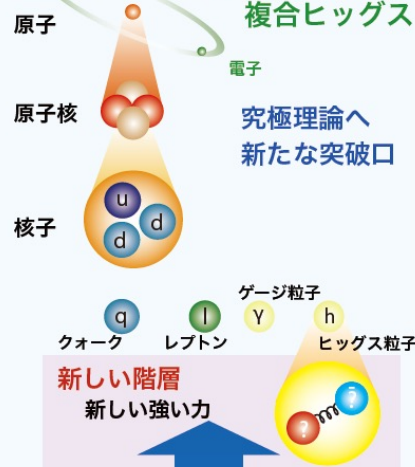
新現象の3つの可能性

時空概念の拡張
超対称性または余剰次元

究極理論へ一直線



物質構造の拡張
複合ヒッグス



全く新しい原理？
複数字宙+人間原理？

標準理論と究極理論が直結？



第二の道：「より深い階層」

第一の道：「新たな次元」

第三の道：「複数字宙？」

ILC

標準理論からのズレが見られなかった場合

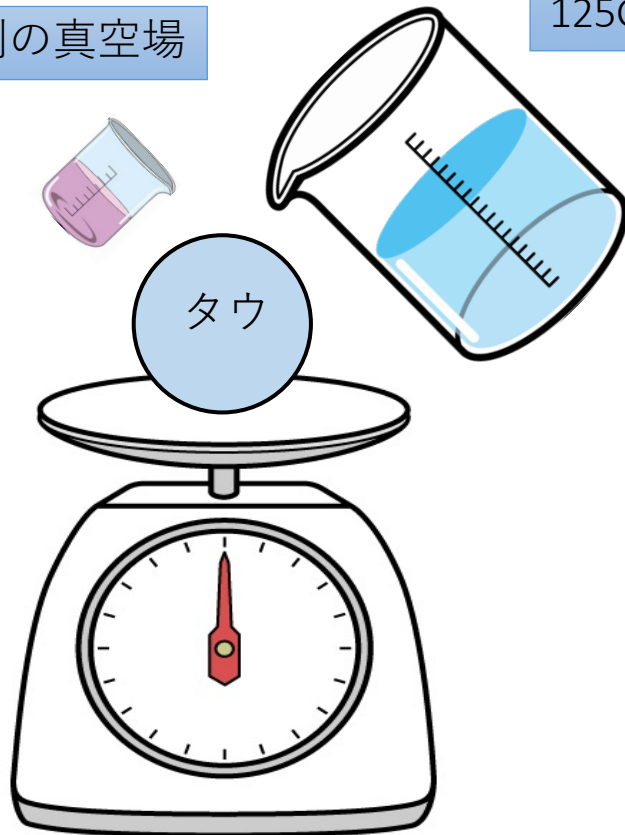
※ 超対称性 = 物質粒子と力の粒子を入れ換える新しいタイプの次元

12

ILCでどのような新現象として？

第一の道の時、必ず別の真空場も存在している。

別の真空場



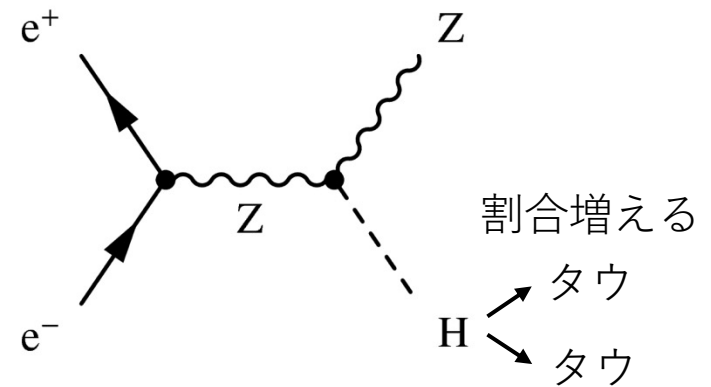
発見された
125GeVヒッグス場

ヒッグス粒子との結合の強さ

κ_F

質量の一部が、別の「真空場」からの寄与：ヒッグス粒子と素粒子の結合強度変化する → 比例関係が破れる

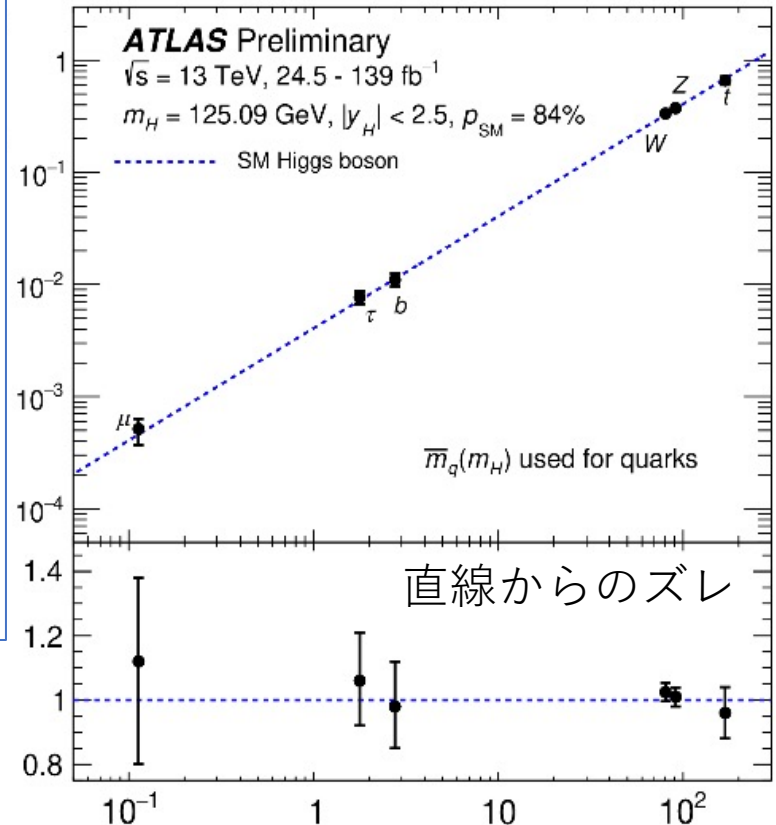
1%程度の精度必要



割合増える

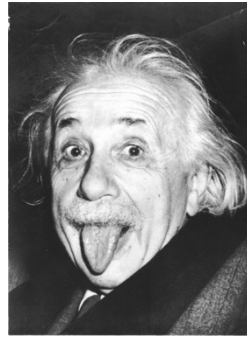
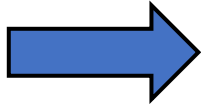
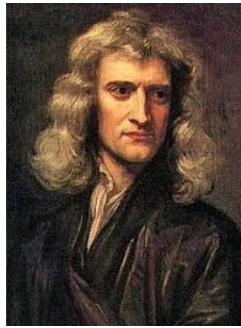
タウ

タウ



粒子の質量[GeV] 6

価値：本当に、この世界って4次元？

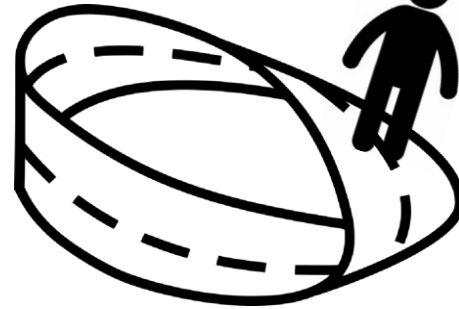


第一の道
発見されると



超対称性

電子君



空間は簡単な3次元ではなく
メビウスの輪の様な構造

空間3次元
時間は別扱い

時間も空間も同じ
時空4次元に拡張

社会的価値

1) 時空の概念変える

人口に膾炙

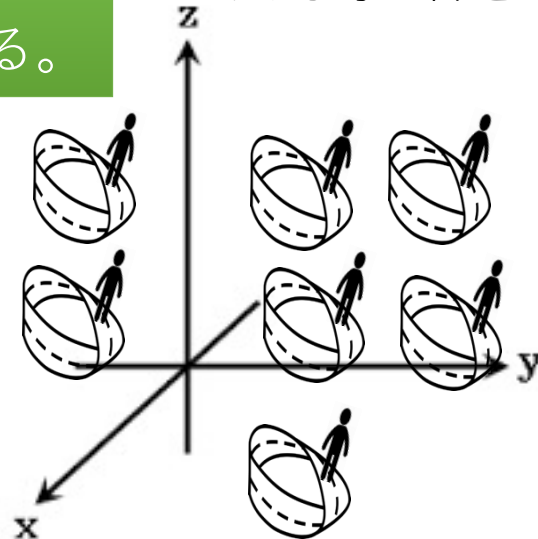
- 2) 物質・力の区別をなくす
- 3) スピンと言う形で応用？

学術的価値

- 4) 暗黒物質
- 5) 力の大統一→ 次のページ
- 6) 物質の起源解明

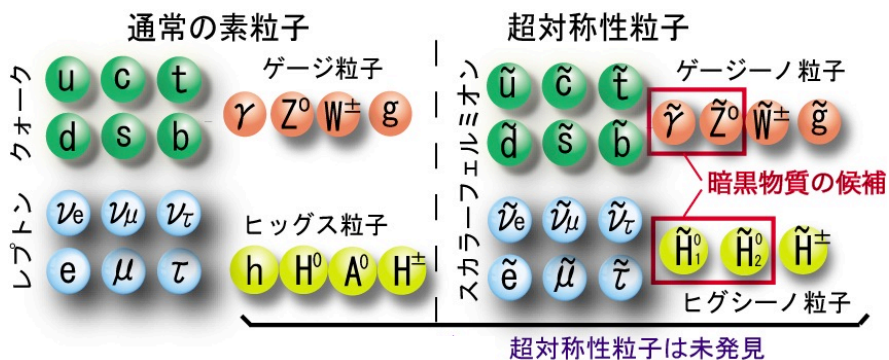
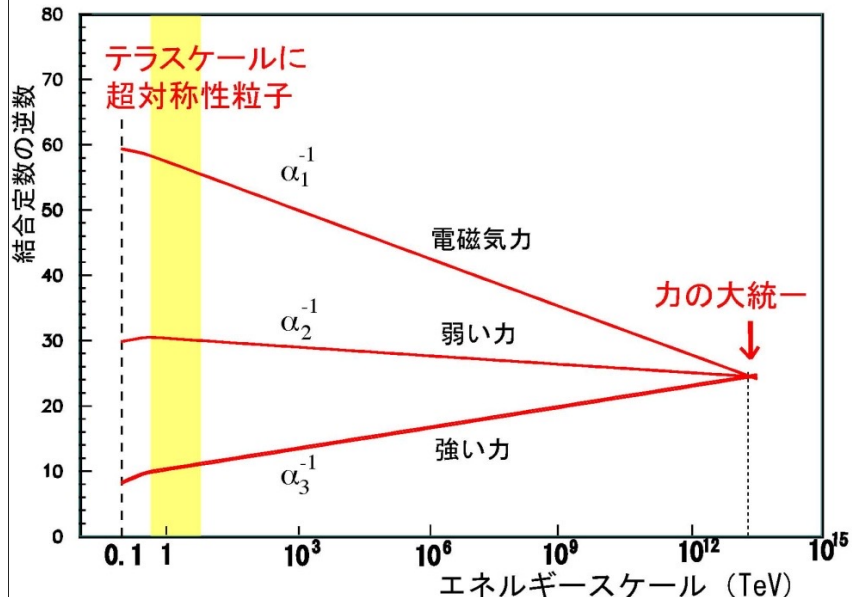
構造：スピン
物質 ↔ 力
区別がなくなる。

局所的に裏表
大局的に普通の3次元

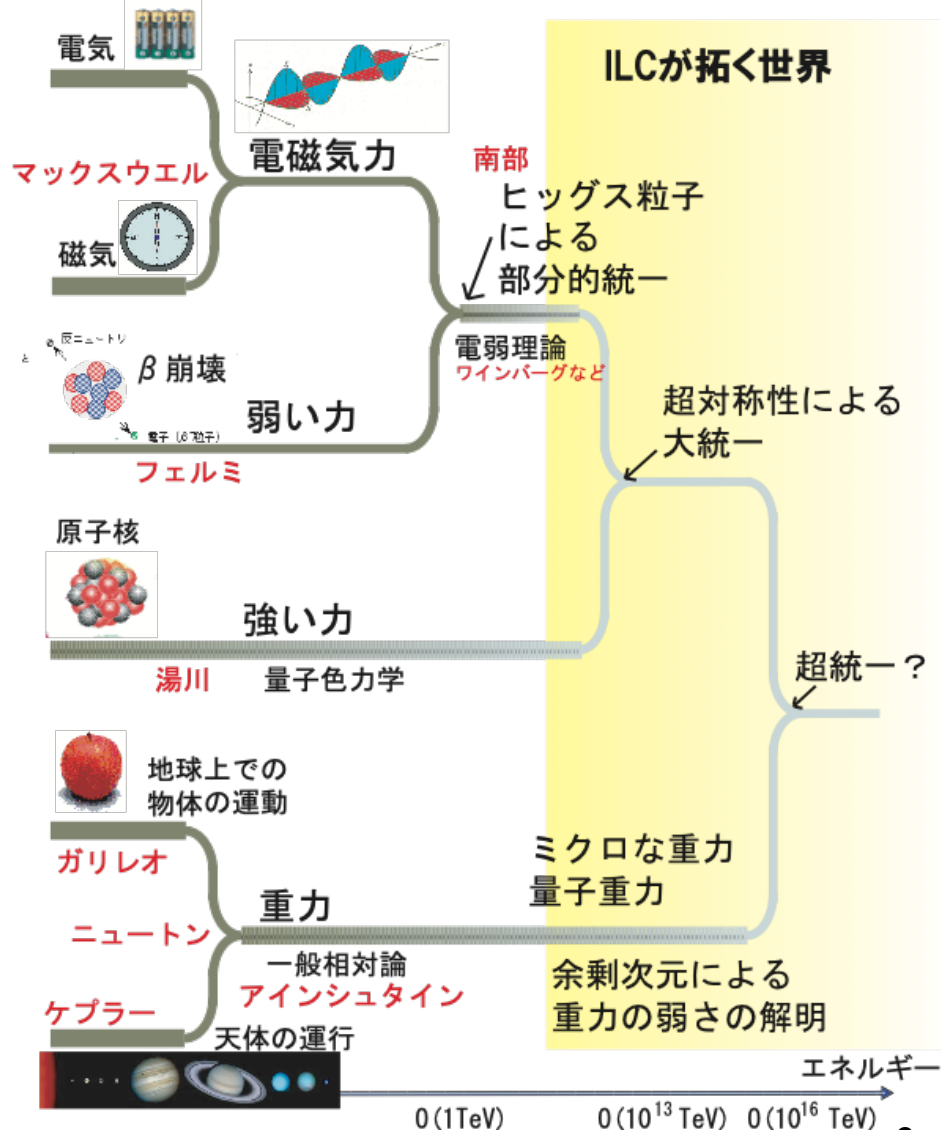


超対称性が示唆された場合 学術的意義

力の大統一の可能性（超対称性粒子の示唆）



超対称性と「力の統一」



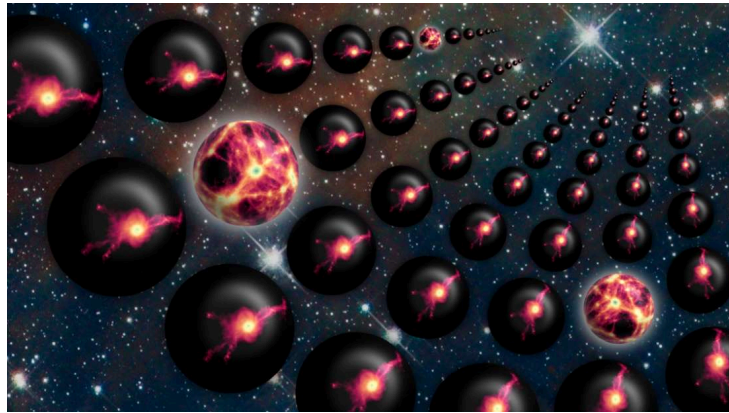
(2) 第三の道 マルチバース？

ILCでどのように？

結合の強さを精密に測定しても、標準理論と一致

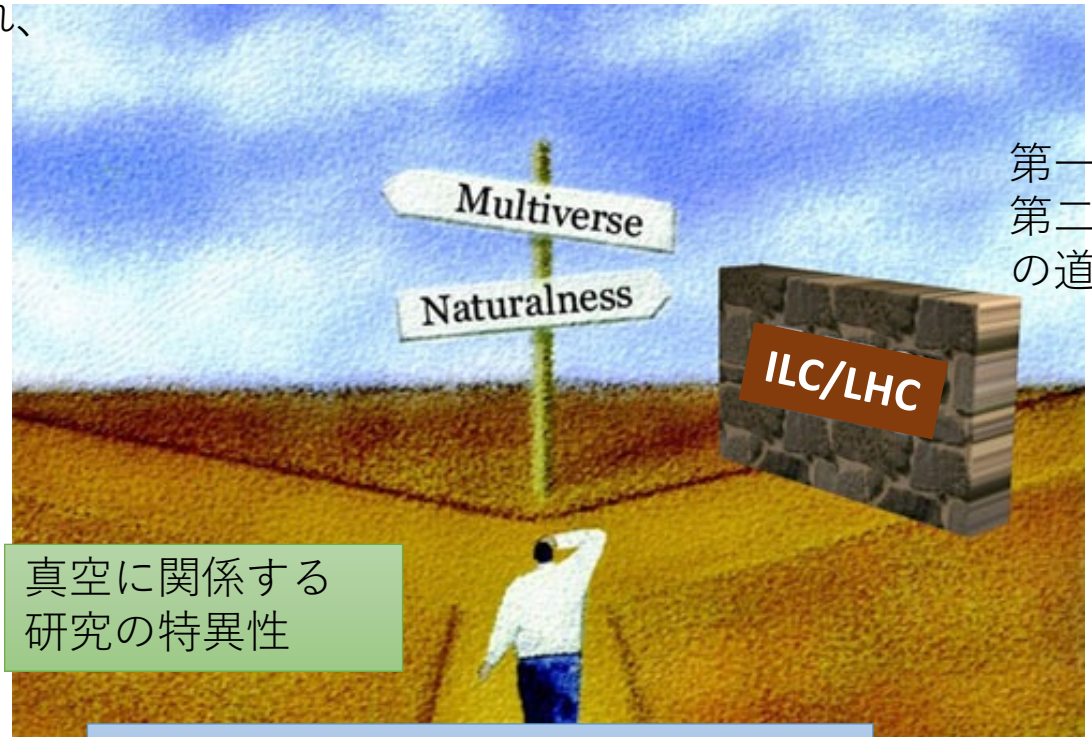
ヒッグス粒子の質量($\sim 100\text{GeV}$)は、第一や第二の道のような仕組みがなかったら、自然にはヒッグス粒子は、もっともっと重い $\sim 10^{19}\text{GeV}$
 $\sim 1/10^{35}$ くらいの確率 (あり得ない確率) でしか、 $\sim 100\text{GeV}$ にならない

(あり得ない) 無数の宇宙が生成され、
変な条件のときだけ成長・安定



多宇宙世界 ! ?

社会的価値：
これはこれで
凄いと思います。



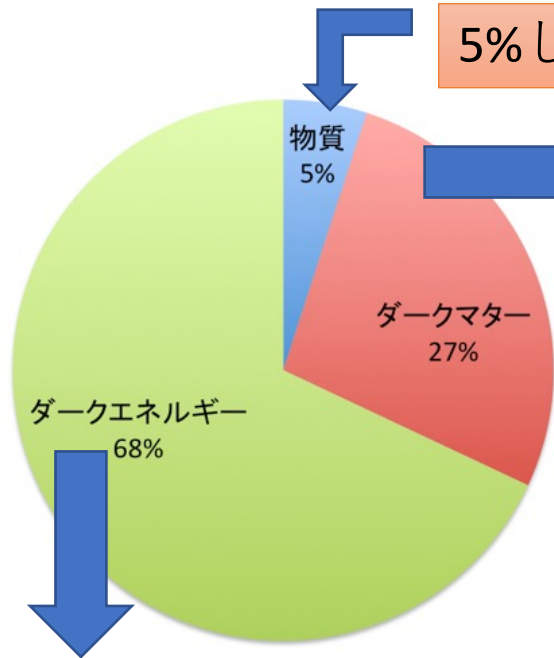
真空に関する
研究の特異性

学術的価値：
ボトムアップ型の研究手法の限界

第一
第二
の道

(3) 暗黒物質の解明

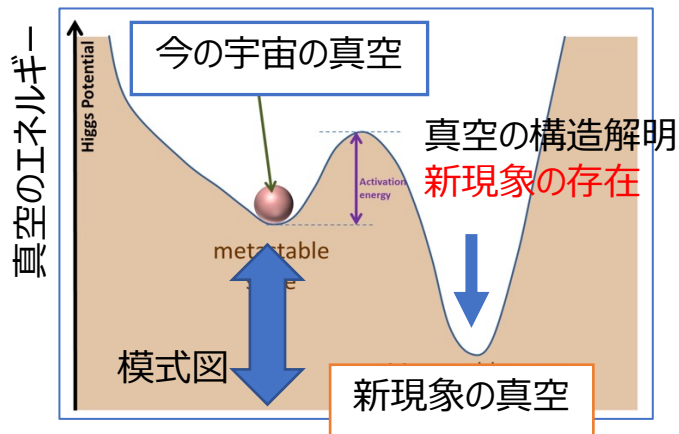
5%しか分かってない



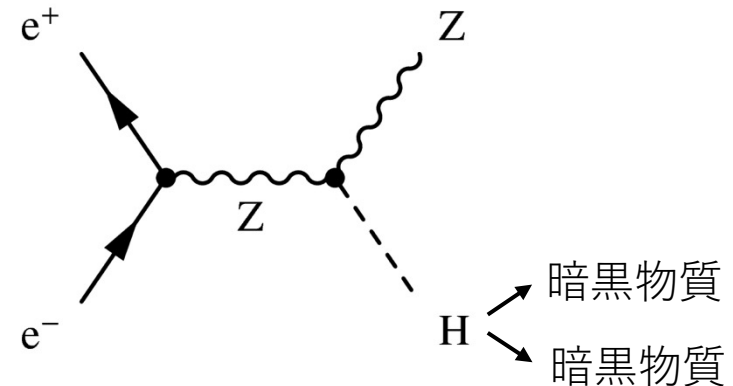
大きく分けて3つの可能性

- WIMP と呼ばれる 超対称性粒子 → (1)で研究
- 軽い場合
- Axion (10^{11}GeV 超高エネルギー素粒子現象を反映)

ILCでどのような新現象？

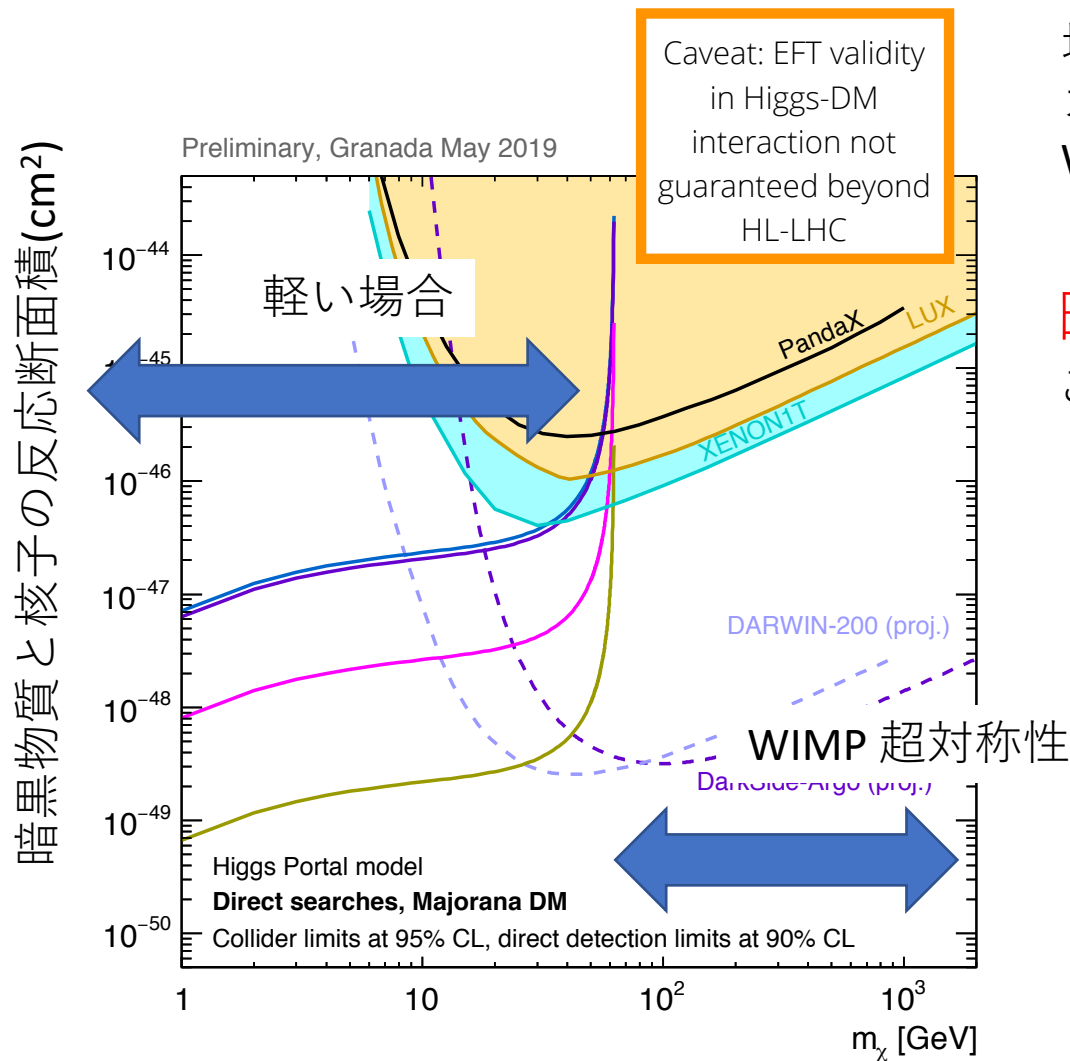


これが
ダークエネルギーの
はず。。。



ヒッグス粒子が消えたように
見える

暗黒物質発見能力とその価値



暗黒物質の質量(GeV)

地下実験で探せない軽い場合を
カバー：

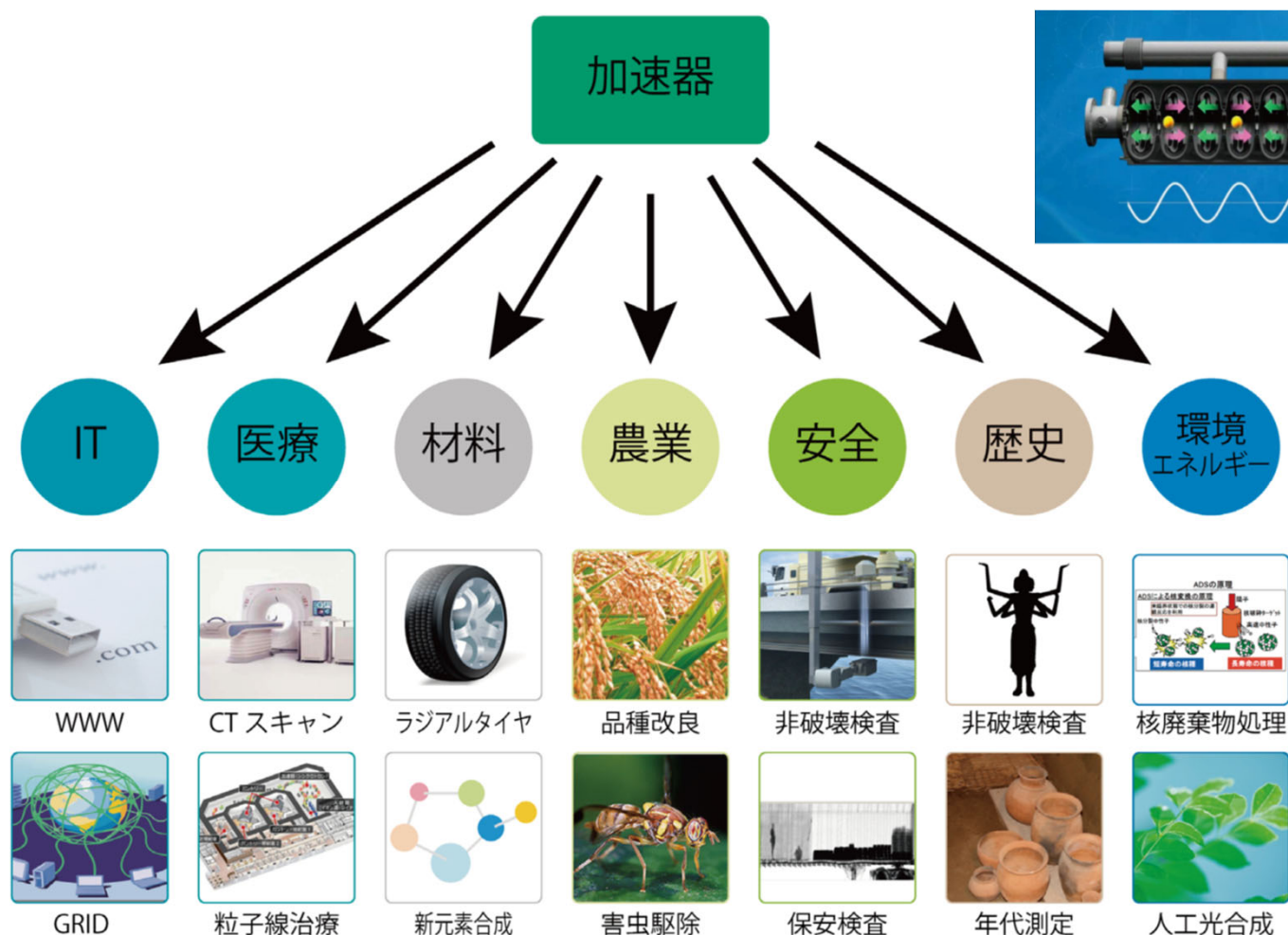
WIMPと合わせて包囲網

暗黒物質：

この宇宙の進化を決めている
この宇宙がどのような進化で
現在の形になった？
今後どうなっていく？

[2]加速器技術の応用 社会への還元

加速器による技術波及効果

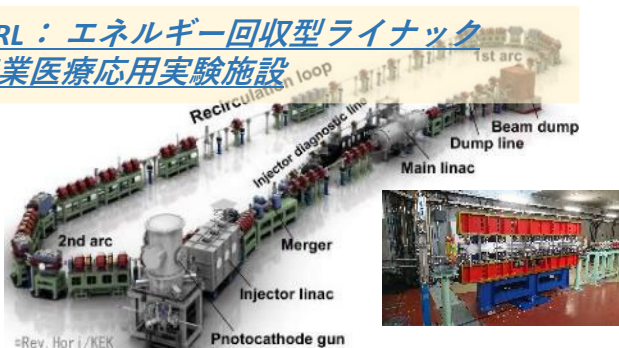


加速器施設や実験施設のための測定器は様々な技術を集めて作られます。これまでも、加速器技術、測定器技術、また実験解析のための情報技術は、医療、産業、情報通信など広い分野に応用されてきました。世界最先端の技術を集めて初めて可能になるILCは、さらなるイノベーションの源泉になることが可能です。

超伝導加速器の産業・医療応用例

KEK-CASAは、ILCのための超伝導加速器開発を、産業・医療応用も見据えて取り組んできました。日本での超伝導加速器の進歩により、産業・医療応用の普及、高度化が進展しています。

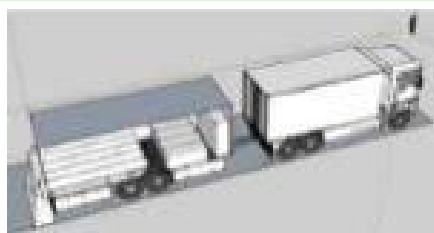
cERL：エネルギー回収型リナック 産業医療応用実験施設



超伝導加速器による“分子振動を利用する高効率加工プロセス用中赤外高出力レーザー光源開発”、NEDO)

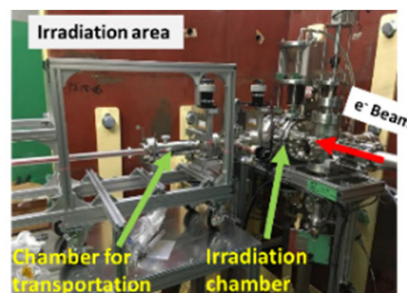


次世代リソグラフィは～10kWのEUV光源
超伝導加速器によるERL-FELが有望

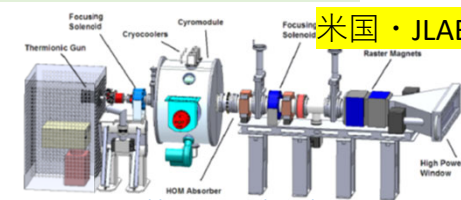
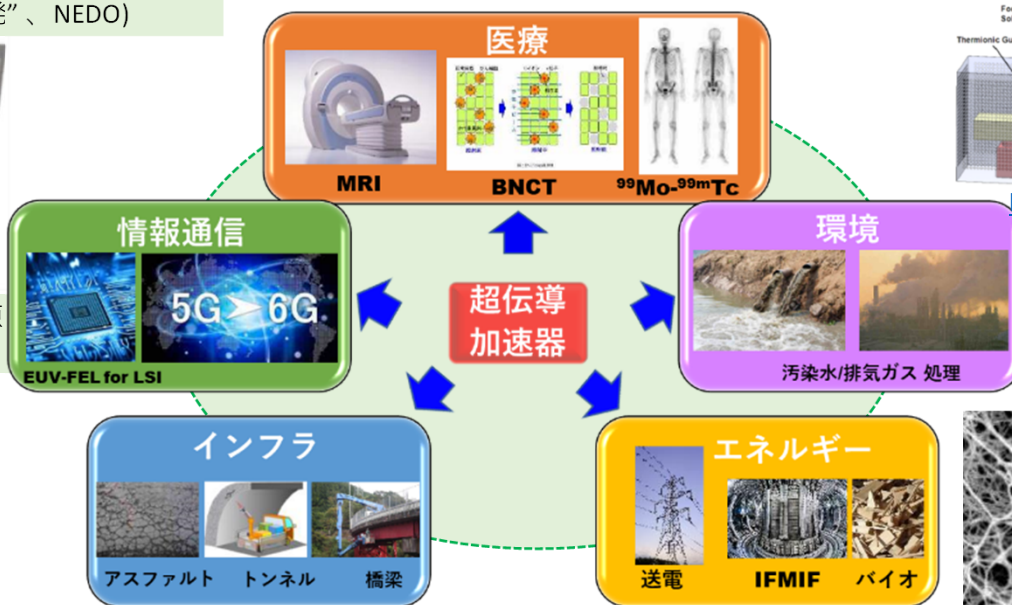


<https://inspirehep.net/files/cb2f9d14b50af4cd11b06064857b33cb>

アスファルトに超伝導加速器からの電子ビームを照射して強靱化。(民間企業からの受託研究、共同研究)

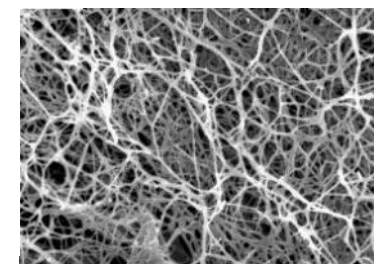


KEKのcERLで核医学診断に利用するMo-99製造とテクネチウム抽出を実施(2019.10 KEKニュース)に掲載された。(民間企業からの受託研究)



<https://arxiv.org/abs/1802.08289>

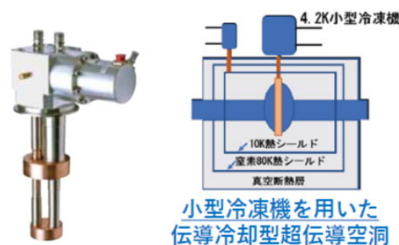
電子線照射による水の浄化



電子線照射によるナノセルロースの高効率・低コスト製造 (AISTとの共同研究、NEDO)

将来の超伝導加速器の産業・医療応用に向けて

プレラボでのWP・技術実証は日本の超伝導加速器の普及、先端加速器技術進展に貢献できる。
超伝導空洞の量産技術の実証、ビーム制御・診断技術、照射ターゲット技術など。



大型冷凍機

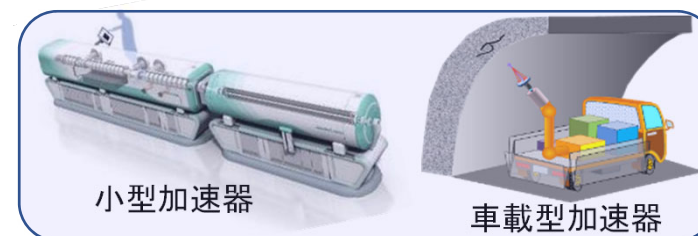
空洞の高性能化

～20年
 $\text{Nb}_3\text{Sn}/\text{Cu}$
空洞低価格化

～10年
 $\text{Nb}_3\text{Sn}/\text{Nb}$
脱-(高圧ガス保安法 & 大型冷凍機)

プレラボの超伝導空洞量産実証:
超伝導高周波加速器の普及
量産技術確立による産業育成

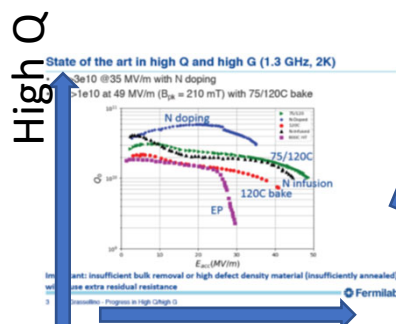
～5年
Nb空洞の高性能化・コスト削減
Nb板材料、表面処理



将来加速器につながるプレラボのナノ
ビームの制御・診断技術

プレラボの陽電子生成ターゲット・
ビームダンプ技術

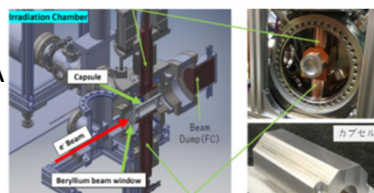
電子を出力するための窓、ガンマ線発生用ターゲット等の開発



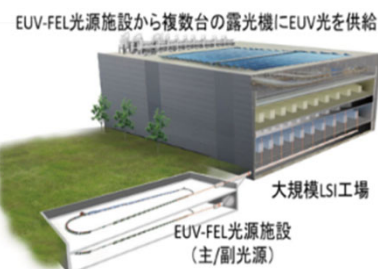
High G



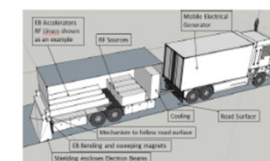
200 W
20 MeV 10uA



800 MeV 10 mA
EUV-FEL光源(～10kW)



～200 kW、5～30 MeV
Mo-99、木材照射、アスファルト改質



将来の車上搭載型超伝導加速器

<https://inspirehep.net/files/cb2f9d14b50af4cd11b06064857b33cb>

加速器と材料

すでに実用化され、生活の質（QOL）向上に貢献した例

加速器と工業技術の深い関係を示す良い例が「自動車」です。自動車は約3万点の部品で構成されます。鉄鋼、非鉄金属、ゴム、プラスチック、紙などの材料が用いられて、開発・生産過程で加速器が活用されています。例えば、タイヤの製造には電子加速器が使われます。原材料の生ゴムに放射線を照射すると強度が増します。精度の高い成形を行うことも可能となり、タイヤの品質・安全性が向上し、ゴムの使用量の削減にも役立ちます。例としてJ-PARCの中性子ビームライン、Spring-8の放射光ビームラインとスーパーコンピュータ京を用いた新材料開発技術が挙げられます。加速器を用いたゴム内部の構造と運動性の詳細解析とコンピュータシミュレーションを行い、タイヤの相反性能である低燃費性能、グリップ性能に加え耐磨耗性能の大幅な向上が可能となる新材料開発技術を完成しました。

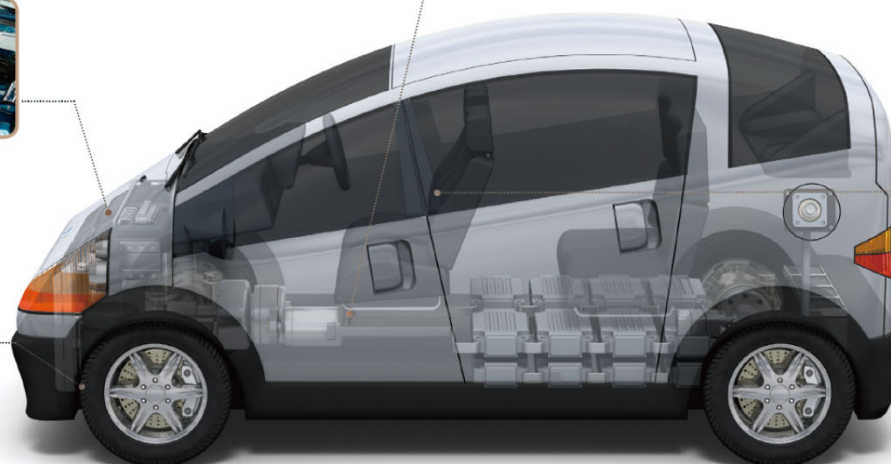
エンジンルームの中のさまざまな耐熱性電線の製造にも電子加速器が使われています。電線の皮膜に使われるポリエチレン等のプラスチック類は、放射線照射で溶剤や熱に強くなり、電気絶縁性・耐薬品性が増します。このため、エンジンルームのような高温環境でも、熱や油等による摩耗を防ぐことができ、安全性の高い自動車の製造を実現しています

エンジンルーム



日本国内では、年間約2億本のタイヤが製造されており、その90%以上が「ラジアルタイヤ」です。そのラジアルタイヤの90%以上が電子加速器を使って製造されています。

タイヤ



電子制御装置



自動車には、燃料インジェクターの制御や、エアコンのインバーターなどさまざまな電子制御装置が使われます。これらの装置の心臓部が半導体素子。半導体の素材であるシリコンに電子線を照射することによって、シリコン結晶のばらつきを制御。電流の流れをコントロールし、半導体の機能を向上させています。また、電子線照射は、素材の強化にも役立っています。

内装



自動車のインストルメントパネルやドア、シートなどのプラスチック製内装部品の多くは製造過程で放射線が照射されています。ドアやシートの緩衝材、エアコンの断熱材などには「発泡プラスチック」が使われています。型に入れたプラスチック基材の外から放射線を当てて外形を固め、加熱処理で内部に発泡を作ります。車両の軽量化、燃費の向上に役立っています

加速器に関連する要素技術の波及効果

KEKに関わる加速器や実験装置を製作した企業への調査結果では、約6割の企業が技術力を得たという調査結果でした。加速器や測定器の完成後にその効果が現れることが多いことから、様々な形での波及効果が期待されると考えられます。（KEKB加速器の建設には、150社を超える企業が参加）



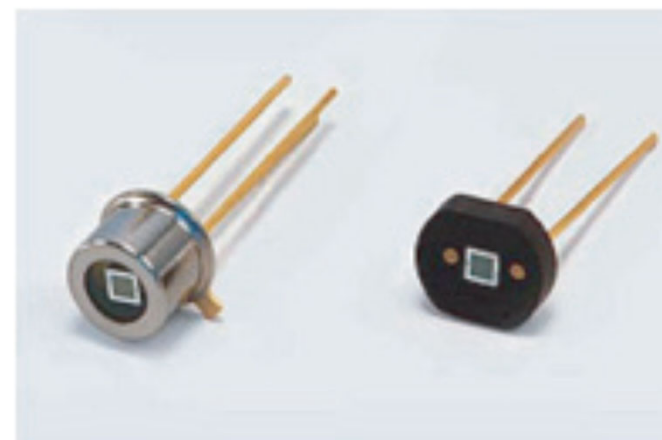
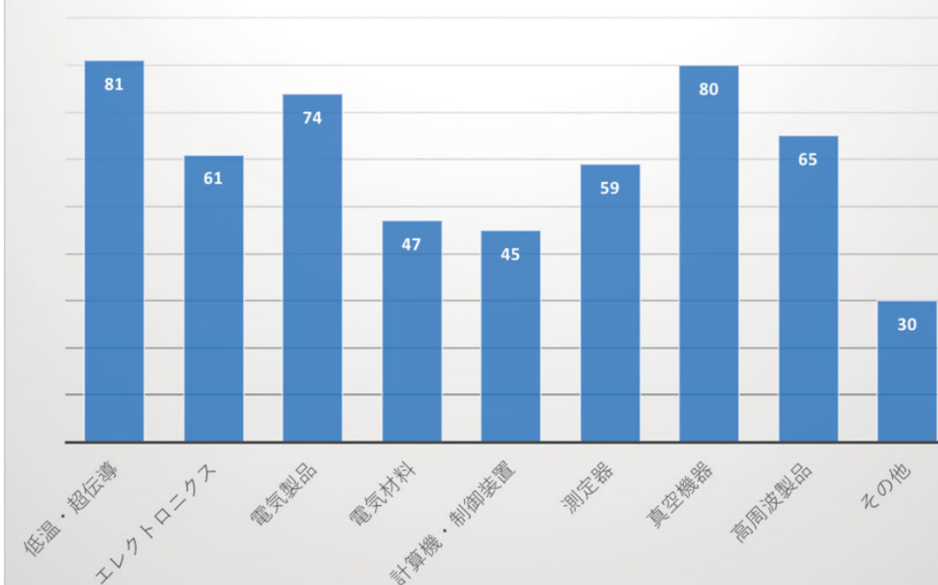
未来技術遺産に登録されたクライストロン（東芝電子管デバイス製）

ILCの建設では、より多くの企業の参加が期待される



J-PARCのニュートリノ実験用ビームラインの超伝導磁石

産業界への技術的波及効果（分野別）



半導体光検出器 (PPD)
KEKと浜松フォトニクス の共同開発

ILC建設から派生されると想定される新規開発分野

ILC開発の技術分野	想定される新規開発分野
超伝導技術	ILC の超伝導加速空洞の電界(加速勾配)性能向上
	量産化(生産工程効率化に向けたロボット導入)
製作技術	空洞の溶接、表面処理技術(電解研磨、ドーピング、コーティング等)
大電力高周波技術	クライストロンの性能向上(電力変換効率改善、RF コンディショニングの時間短縮、超高真空技術等)
	上記の量産化技術の開発
	カプラー、導波管、導波管素子(ダミーロード、サーキュレータ等) の性能向上
	上記の量産化技術の開発
ビーム発生 制御・収束技術	陽電子・電子ビーム発生技術
	ILC 固有のナノ・ビームの制御・安定化、高精度タイミング技術
	精密計測
検出技術	検出器(測定器)の高性能化に関わる技術
	大量に発生する粒子衝突情報の処理技術
ソフトウェア技術	ILC 全体の高精度のマシンコントロールとフィードバックシステム
	エンジニアリング管理、データマネジメント

国際リニアコライダー（ILC）計画に関する技術的・経済的波及効果及び世界各国における素粒子・原子核物理学分野における技術面を含む研究動向に関する調査分析 資料から作成