

# 初めて語ること —私のパラダイム破壊

山口栄一  
京都大学名誉教授  
特任教授(ELP担当)

京都大学 山口栄一 退職記念講演会  
2021年1月8日(金) 15:00~16:30  
京都大学百周年時計台記念館1階  
百周年記念ホール

à l'IMRA Europe, France

# 自己紹介 前半生(1977~1998)

1955年 福岡県福岡市に生まれる  
1977年 東京大学理学部物理学科卒業  
1979年 東京大学大学院理学系修士修了  
(24歳) 理学修士 (東京大学)

1979年 (24歳) NTT武蔵野通研に赴任  
1984年 (29歳) 理学博士 (東京大学)

1984年から1985年まで (29-30歳)  
米国Notre Dame大学客員研究員

1986年 (30歳) NTT基礎研究所主任研究員

1990年 (34歳) NTT基礎研究所主幹研究員

1993年から1998年まで (38-43歳)  
仏国IMRA Europe招聘研究員

生命を物理学的に理解したかったが…時期尚早

第1章 アンダーソン局在における電子相関  
効果の理論的研究 (1977~1979)

FET研究チームに配属され、基礎研究を独りで始める

第2章 III-V族半導体における2次元電子系の  
実験的研究 (1979~1984)

グリーン関数法という強力な理論を学んで帰国

第3章 III-V族半導体におけるDXセンターの  
理論的研究 (1985~1990)

米国チームから闘いを挑まれ、それならば、と…

第4章 III-V族半導体におけるDXセンターの  
実験的研究 (1987~1992)

世界でたった一人、異常な現象を目の当たりにして…

第5章 常温核融合の研究 (1989~1998)

# 自己紹介 後半生(1998~2020)

- 1998年 (43歳) (株)アーグゾーンを起業
- 1999年 (44歳) 経団連21世紀政策研究所研究主幹
- 2001年 (46歳) (株)パウデックをソニーの河合氏と起業  
—まったく新しいパワーランジスタ(GaN)の開発
- 2003年 (48歳) 同志社大学大学院教授
- 2006年 (51歳) (株)ALGANを15名の学生たちと起業  
—まったく新しい紫外線センサー(AlGaN)の開発
- 2008年 (53歳) 英国Cambridge大学客員フェロー
- 2011年 (56歳) CONNEXX (株)を米国の塚本氏と起業  
—まったく新しい電池(LiB, FC)の開発
- 2014年 (59歳) 京都大学大学院 思修館教授
- 2018年 (63歳) ORBIO (株)を学生の周氏・飯嶋氏と起業  
—まったく新しいガン治療法の開発
- 2020年 (65歳) 米国Paradigm社を玉城氏と起業

イノベーション理論と政策  
の研究 (1998~2020)

トランスサイエンス論  
の研究 (2006~2020)



2006/02



2007/05



2012/01



2014/05



2015/03



2016/12



2017/02



2019/03

# 自己紹介 少年時代～前半生(1970～1998)

1955年 福岡県福岡市に生まれる

1970年 1月8日 母死す。

生命を物理学的に理解したかったが…時期尚早

第1章 アンダーソン局在における電子相関  
効果の理論的研究 (1977～1979)



# 自己紹介 少年時代～前半生(1970～1998)

- 1955年 福岡県福岡市に生まれる
- 1970年 1月8日 母死す。
- 1970年 福岡県立修猷館高校入学
- 1973年 東京都立立川高校卒業
- 1977年 東京大学理学部物理卒業
- 1979年 東京大学大学院修士修了  
理学修士 (東京大学)

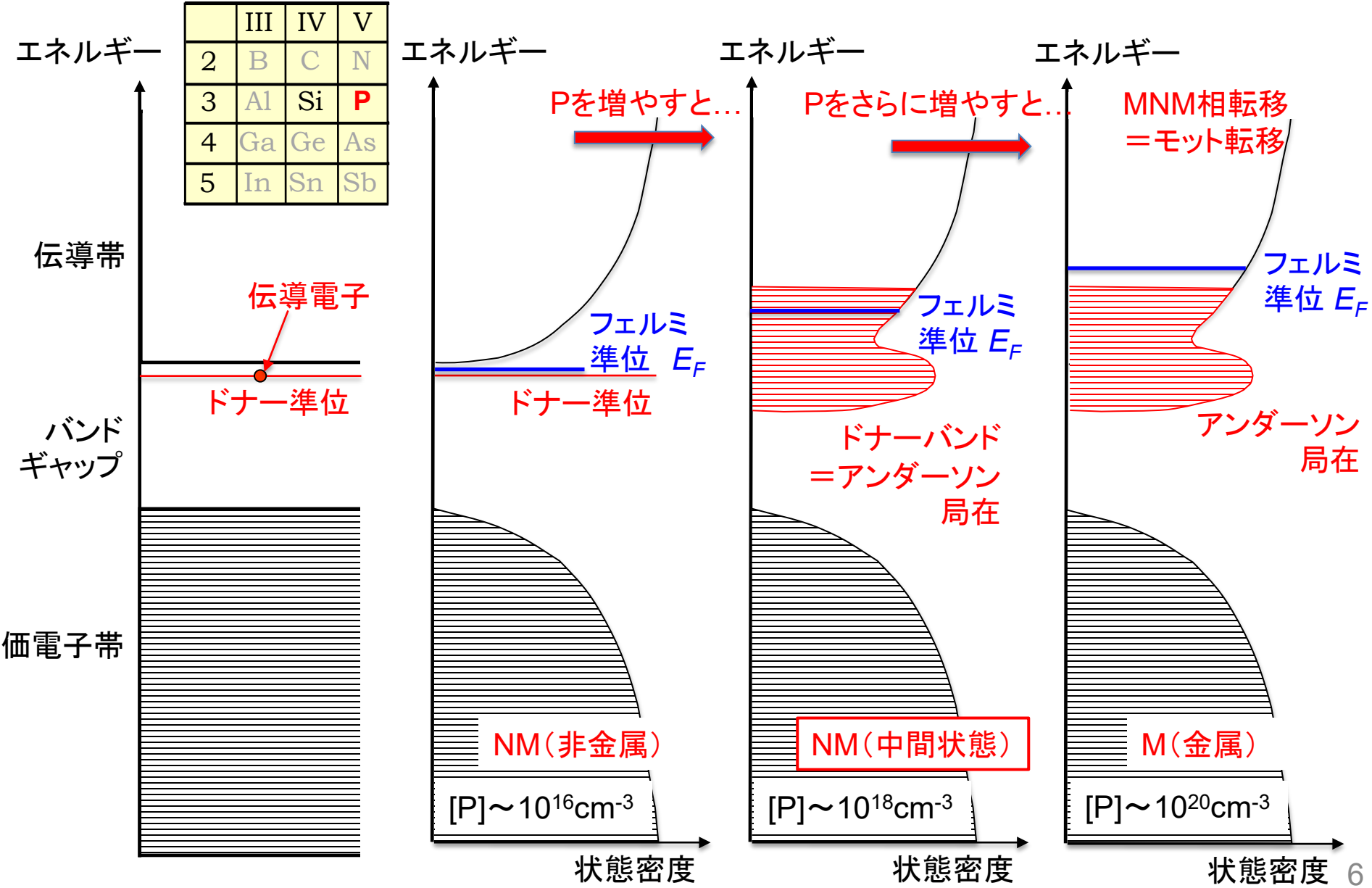
生命を物理学的に理解したかったが…時期尚早

## 第1章 アンダーソン局在における電子相関効果の理論的研究 (1977～1979)



法華經 方便品 第二  
爾時世尊。從三昧。  
安詳而起。告舍利弗。  
諸仏智慧。甚深無量。  
其智慧門。難解難入。  
一切声聞。辟支仏。  
所不能知。

# 第1章 アンダーソン局在：それは何か？



# 第1章 アンダーソン局在: ことの発端

磁化  $M = \chi H$

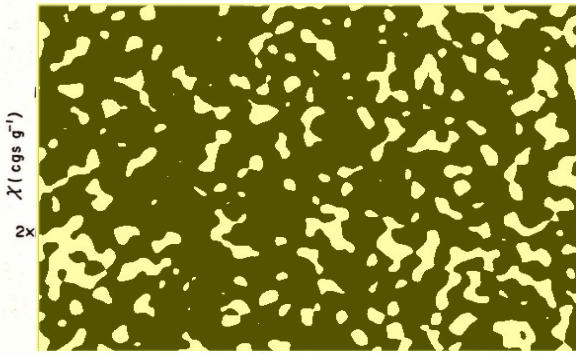
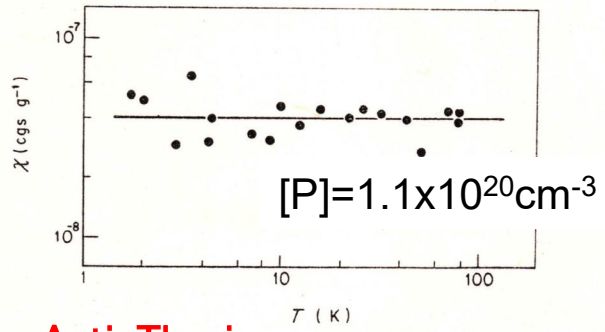
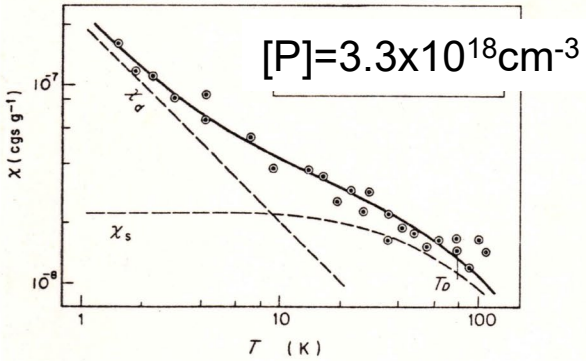
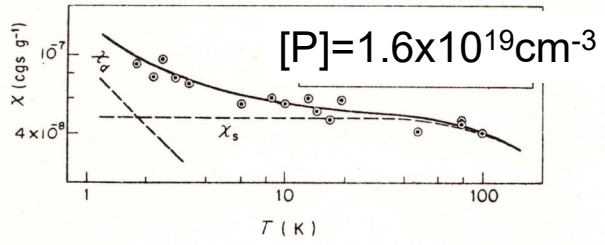
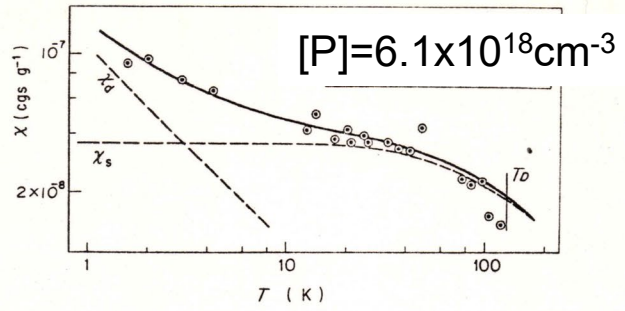
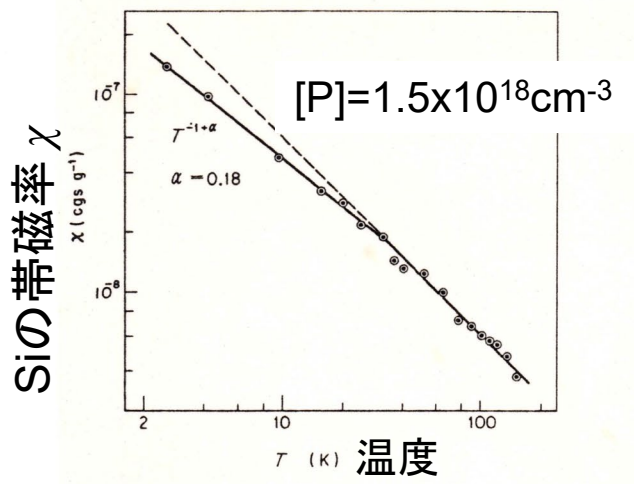
Ue & Maekawa:  
PRB 3, 4232 (1971)

## Si:Pの帯磁率 $\chi$

P濃度が低いと、  
キュリーの法則  
帯磁率 = 1/温度  
に従う  
⇒電子は局在している

P濃度が高いと、  
パウリの法則  
帯磁率 = 温度変化なし  
に従う  
⇒電子は伝導電子

P濃度が中間状態の時、  
Ue & Maekawa は  
Inhomogeneous model  
を提案  
⇒空間的にP濃度の高  
いと低いところが  
混在している



**Anti-Thesis**  
 私たちは、そのmodelが美しくない、  
 と思った。  
 アンダーソンの理論から考えて、  
 系はHomogeneous であるべき！  
 ⇒どうするか？

# 第1章 アンダーソン局在：ハミルトニアンを提唱

Homogeneous model: 新しいハミルトニアンを提唱(大胆にも！)

$$\hat{H}_{YAK} = \sum_{\alpha, \sigma} \varepsilon_{\alpha} \hat{n}_{\alpha\sigma} + \frac{1}{2} \sum_{\alpha, \sigma} U_{\alpha} \hat{n}_{\alpha\sigma} \hat{n}_{\alpha-\sigma}$$

ここで

$$\hat{n}_{\alpha\sigma} = c_{\alpha\sigma}^{\dagger} c_{\alpha\sigma}$$

$\varepsilon_{\alpha}$  = アンダーソン局在  $\alpha$ ,       $U_{\alpha}$  =  $\alpha$  における電子相関

この Yamaguchi-Aoki-Kamimura ハミルトニアン  $\hat{H}_{YAK}$  は、なんと解析的に解ける！

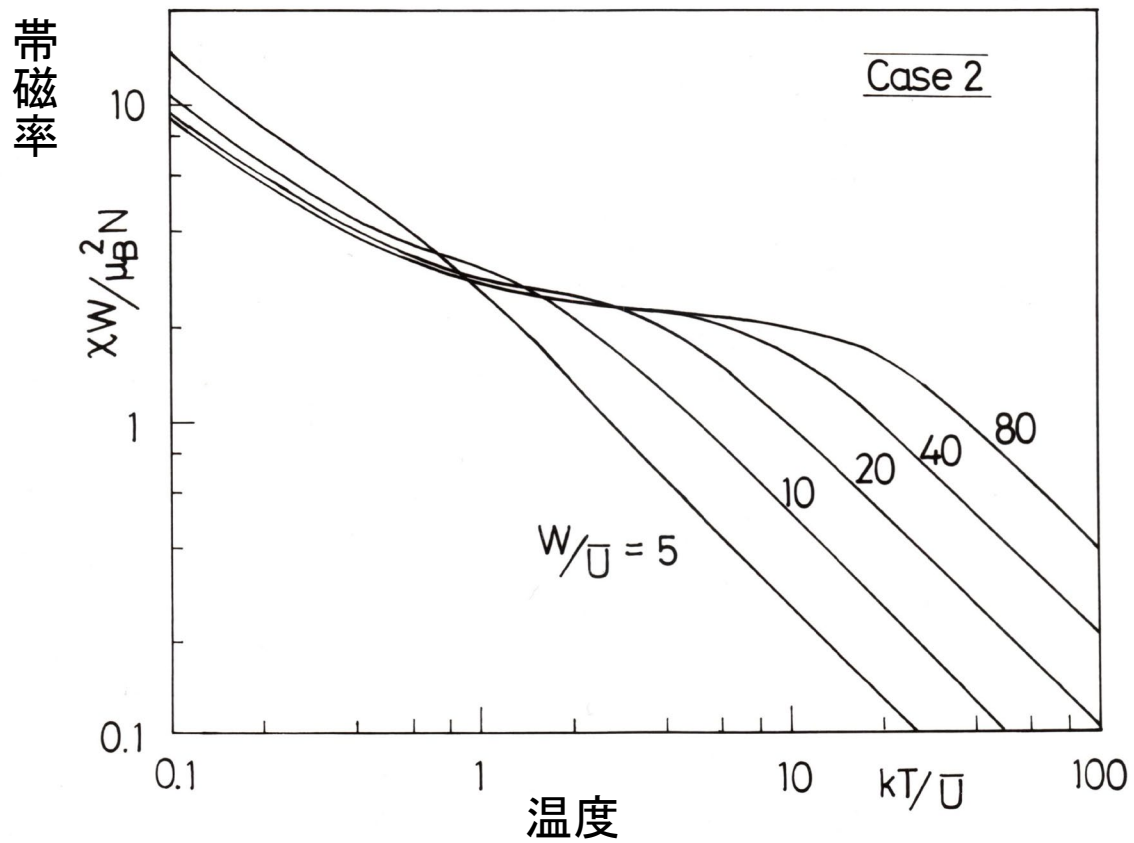
帯磁率

$$\chi = \frac{2\mu_B^2}{kT} \sum_{\alpha} \frac{1}{2 + e^{(E_F - \varepsilon_{\alpha} - U_{\alpha})/kT} + e^{-(E_F - \varepsilon_{\alpha})/kT}}$$

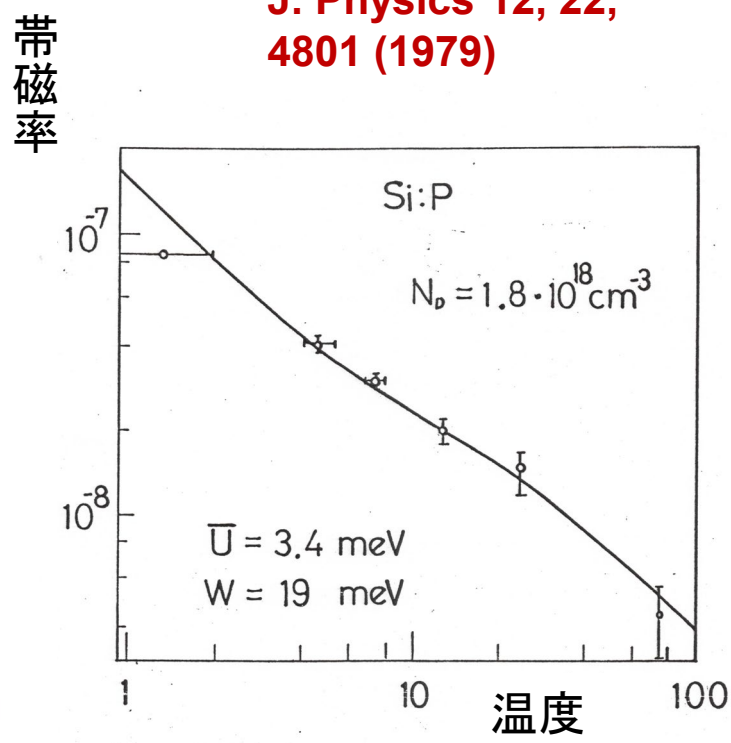


# 第1章 アンダーソン局在：すべての実験を説明

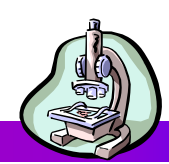
- 帯磁率：Ue & Maekawaの実験をみごとに説明



EY, Aoki & Kamimura,  
J. Physics 12, 22,  
4801 (1979)



- 電子比熱など、その他の物理量についても、理論は実験をみごとに説明した。



# 研究とは何か 開発とは何か

## 研究とは何か

⇒ 知の創造

⇒ 科学のすべて





# 研究とは何か 開発とは何か

## 研究とは何か

⇒ 知の創造

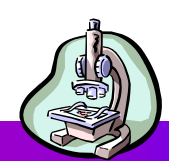
⇒ 科学のすべて , 技術の他の一部

## 開発とは何か

⇒ 価値の創造 (知の具現化)

⇒ 技術の一部

	科学	技術
開発	×	○ 価値をつくる
研究 = 創発	○ まだ見ぬものを見る	○ ないものをあらしめる



# チャールズ・パースの創発“Abduction”

チャールズ・パース(1839～1914年)

1. 驚くべき事実Sが観測された。
2. ある仮説Pが正しければ、Sは当然の帰結となる。
3. よって、仮説Pが正しいと考える理由は存在する。

SからPを導く推論の方法を abduction (創発)と呼ぶ。

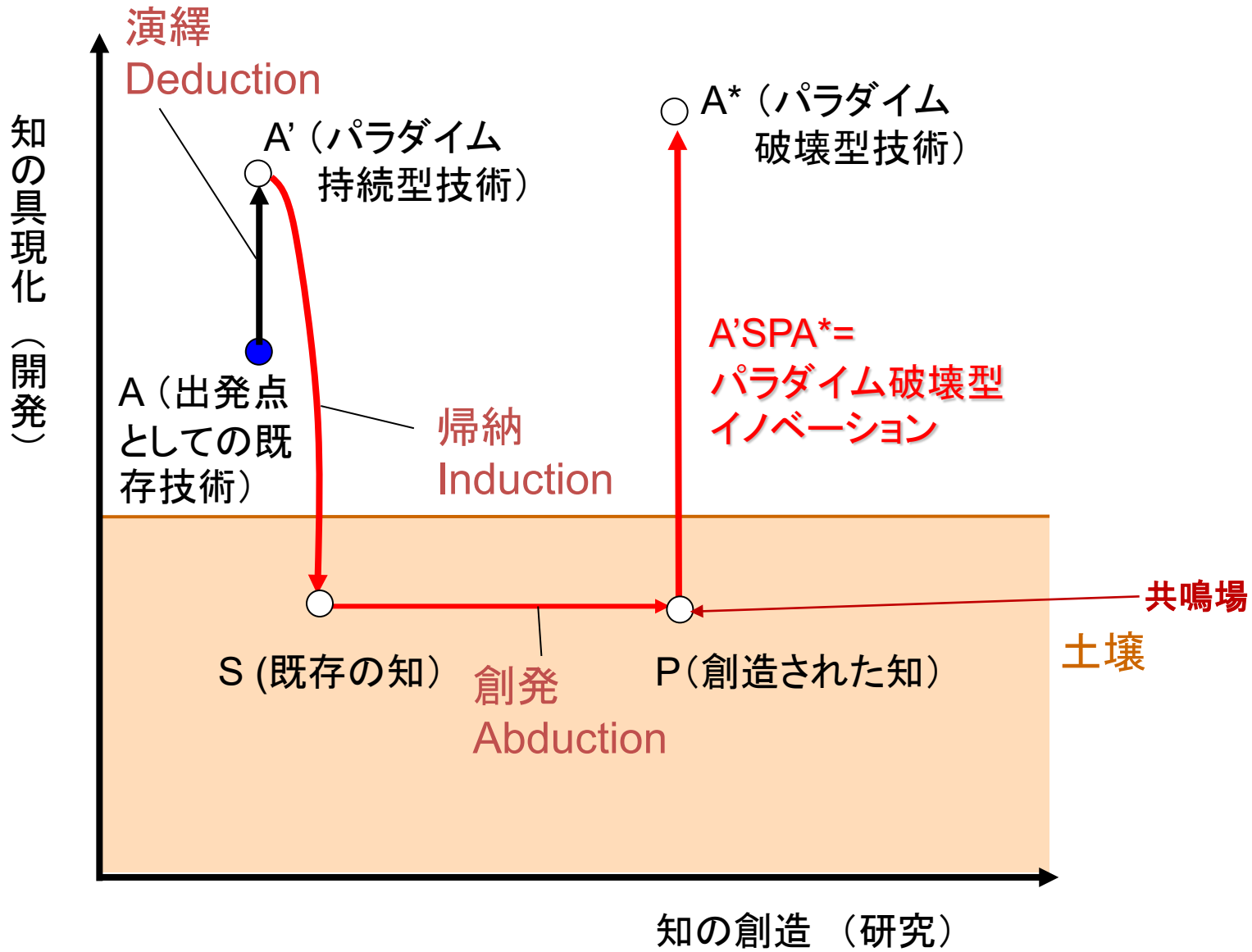
「帰納はなんら新しい観念を生み出すことはできない。同様に演繹にもできない。科学の諸観念はすべて創発Abductionによってもたらされる」

Charles S. Peirce (1965):

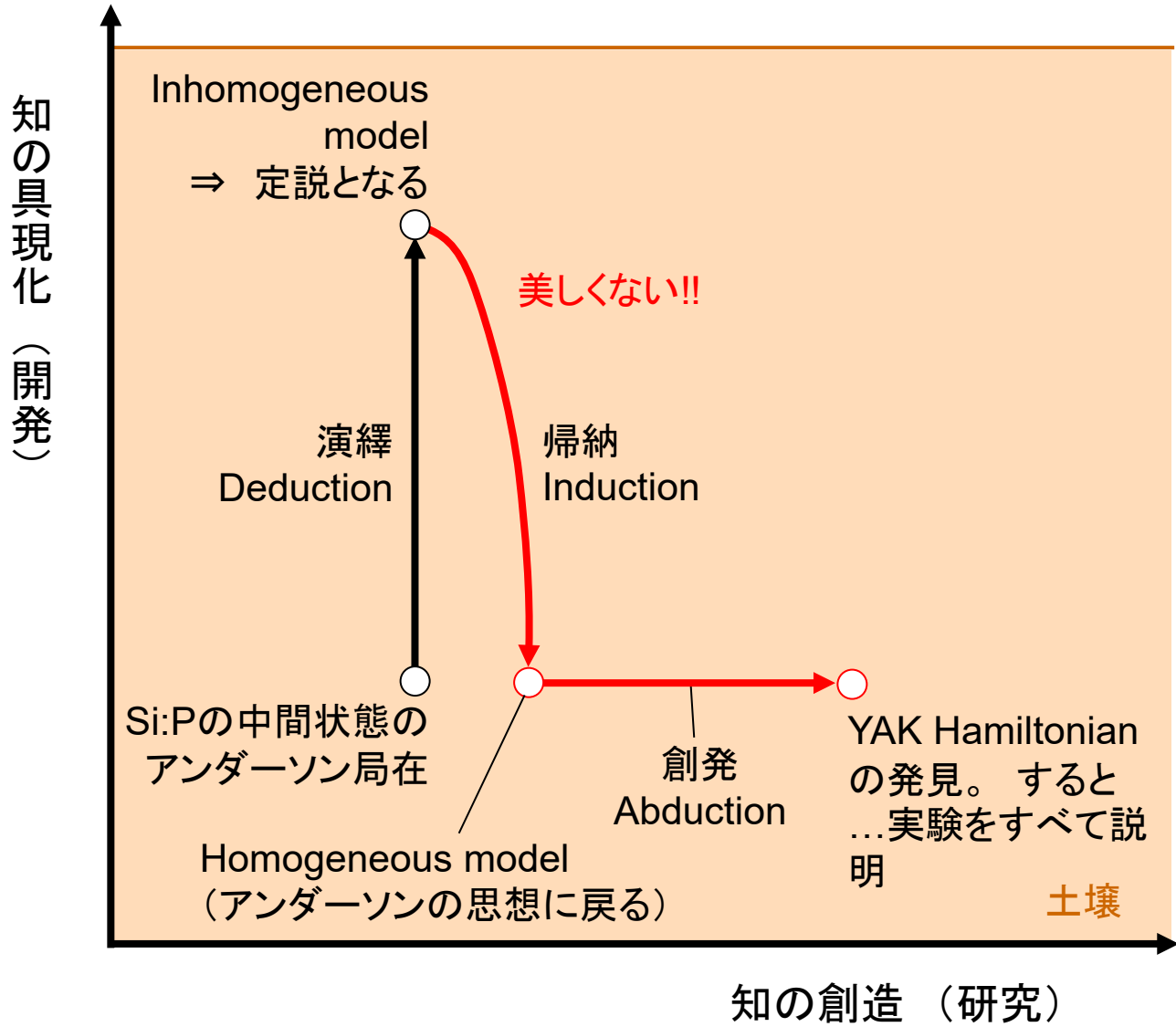
Collected Papers of Charles Sanders Peirce, Belknap Press.



# イノベーション・ダイアグラム



# 第1章 アンダーソン局在:イノベーション・ダイアグラム



# 自己紹介 前半生(1977~1998)

- 1955年 福岡県福岡市に生まれる
- 1977年 東京大学理学部物理学科卒業
- 1979年 東京大学大学院理学系修士修了  
(24歳) 理学修士 (東京大学)
- 1979年 (24歳) NTT武蔵野通研に赴任
- 1984年 (29歳) 理学博士 (東京大学)
- 1984年から1985年まで (29-30歳)  
米国Notre Dame大学客員研究員
- 1986年 (31歳) NTT基礎研究所主任研究員
- 1990年 (35歳) NTT基礎研究所主幹研究員
- 1993年から1998年まで (38-43歳)  
仏国IMRA Europe招聘研究員

生命を物理学的に理解したかったが…時期尚早

第1章 アンダーソン局在における電子相関  
効果の理論的研究 (1977~1979)

FET研究チームに配属され、基礎研究を独りで始める

第2章 III-V族半導体における2次元電子系の  
実験的研究 (1979~1984)

グリーン関数法という強力な理論を学んで帰国

第3章 III-V族半導体におけるDXセンターの  
理論的研究 (1985~1990)

米国チームから闘いを挑まれ、それならば、と…

第4章 III-V族半導体におけるDXセンターの  
実験的研究 (1987~1992)

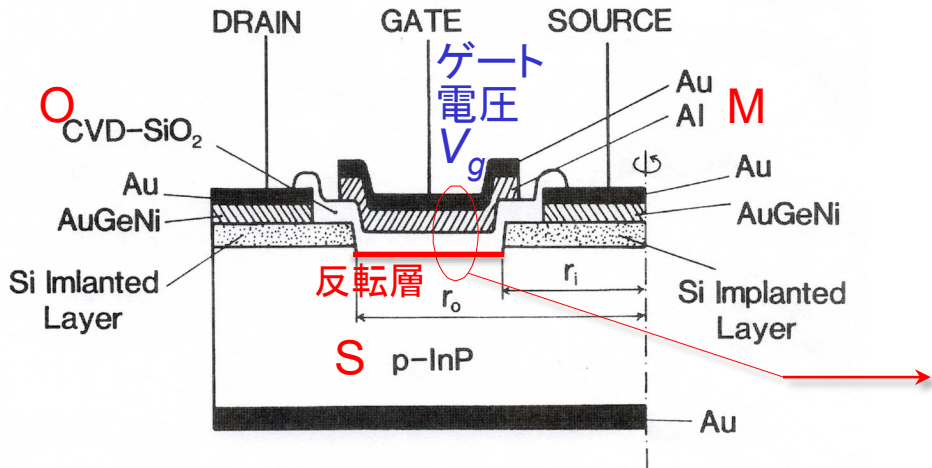
世界でたった一人、異常な現象を目の当たりにして…

第5章 常温核融合の研究 (1989~1998)

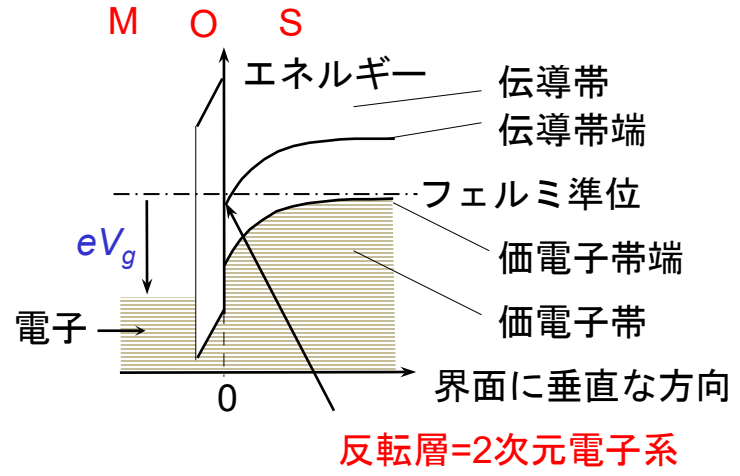
# 第2章 2次元電子系：ことの発端

電子速度  $v = \mu E$

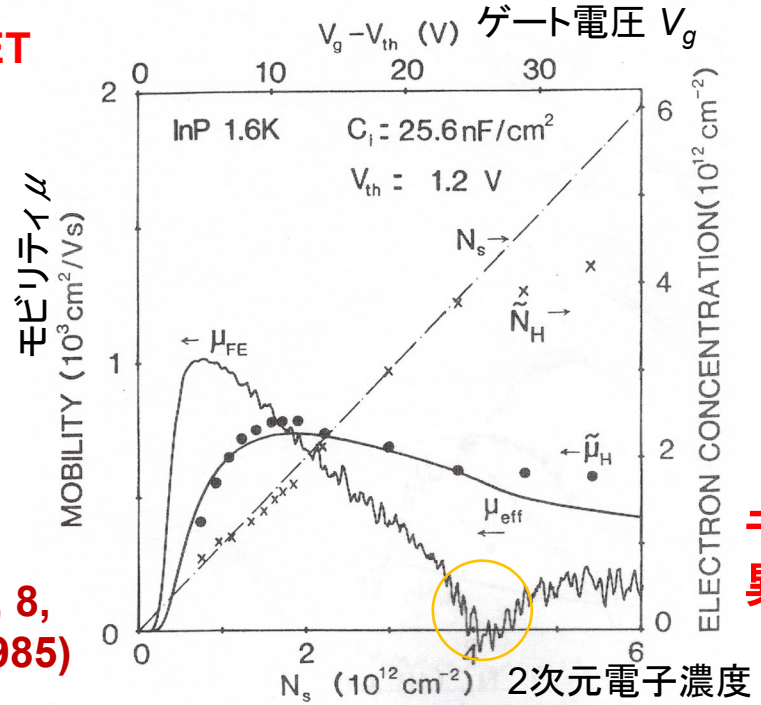
## InP-MOSFET



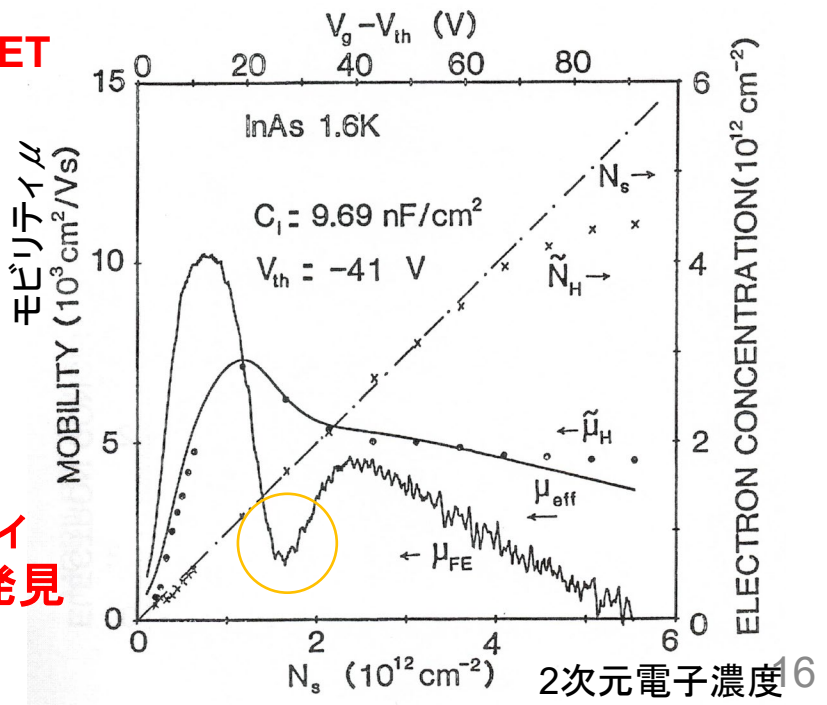
## エネルギー図



## InP-FET



## InAs-FET



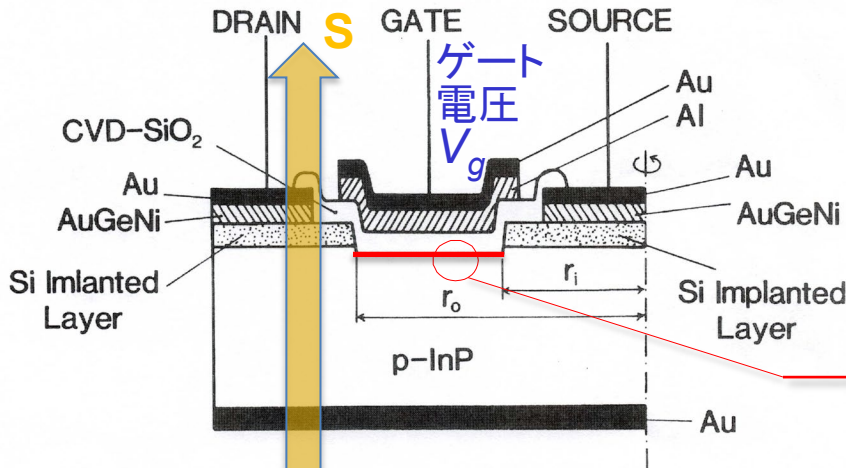
モビリティ異常を発見

EY, PRB 32, 8, 5280 (1985)

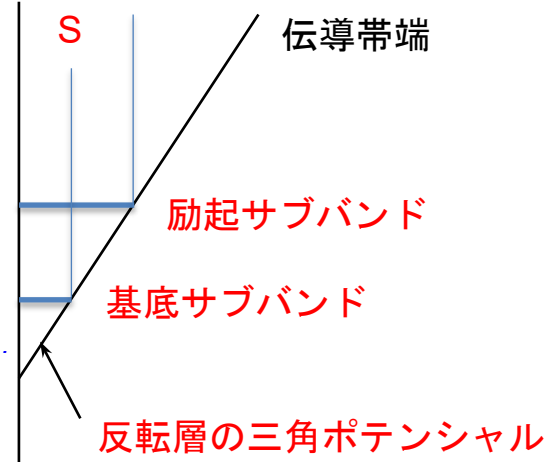


# 第2章 2次元電子系： 本質に下りてみよう！と決意！

## InP-MOSFET



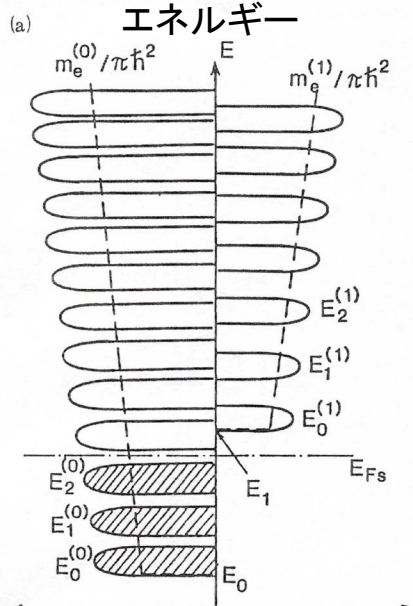
## エネルギー図



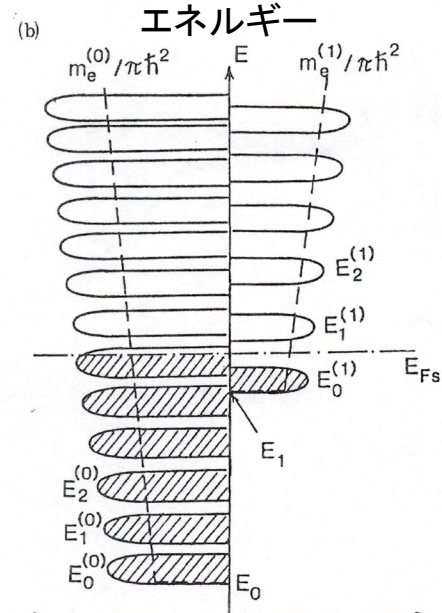
垂直磁場  $H$  をかけると...

2次元電子が層内で回転を始めて0次元状態になる  
⇒ランダウ準位

電子の状態密度が飛び飛びになり  
電流がゲート電圧の関数として量子振動をする = Shubnikov de Haas効果

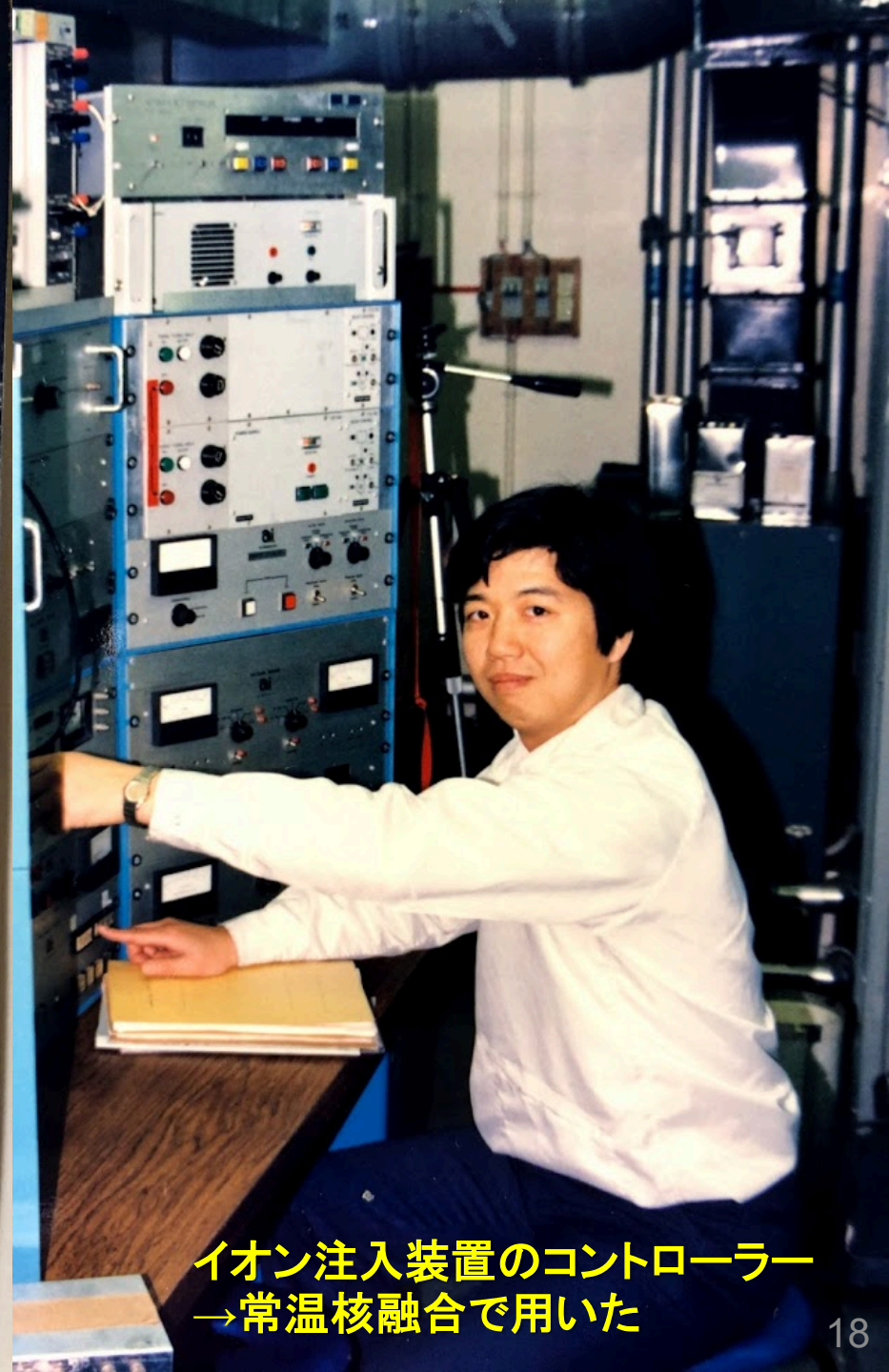


基底サブバンドの状態密度      励起サブバンドの状態密度



基底サブバンドの状態密度      励起サブバンドの状態密度

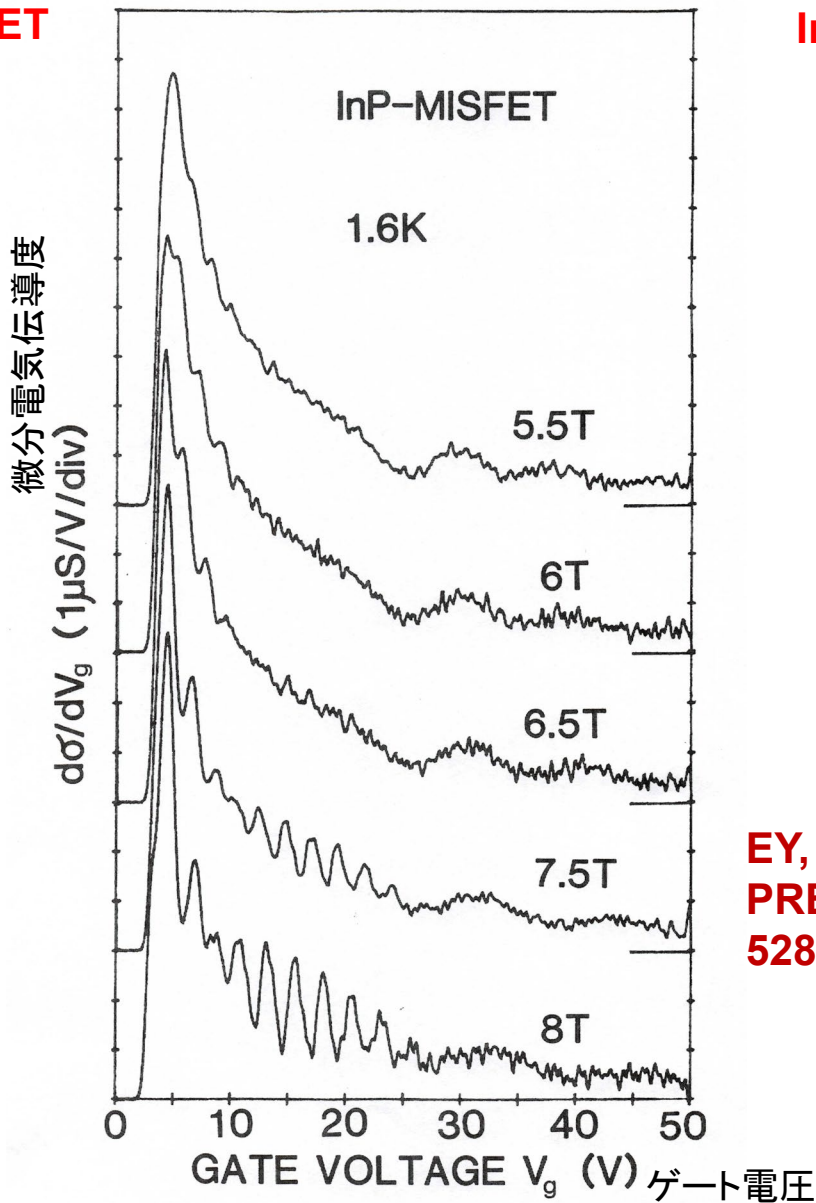
# 自作の超伝導マグネット



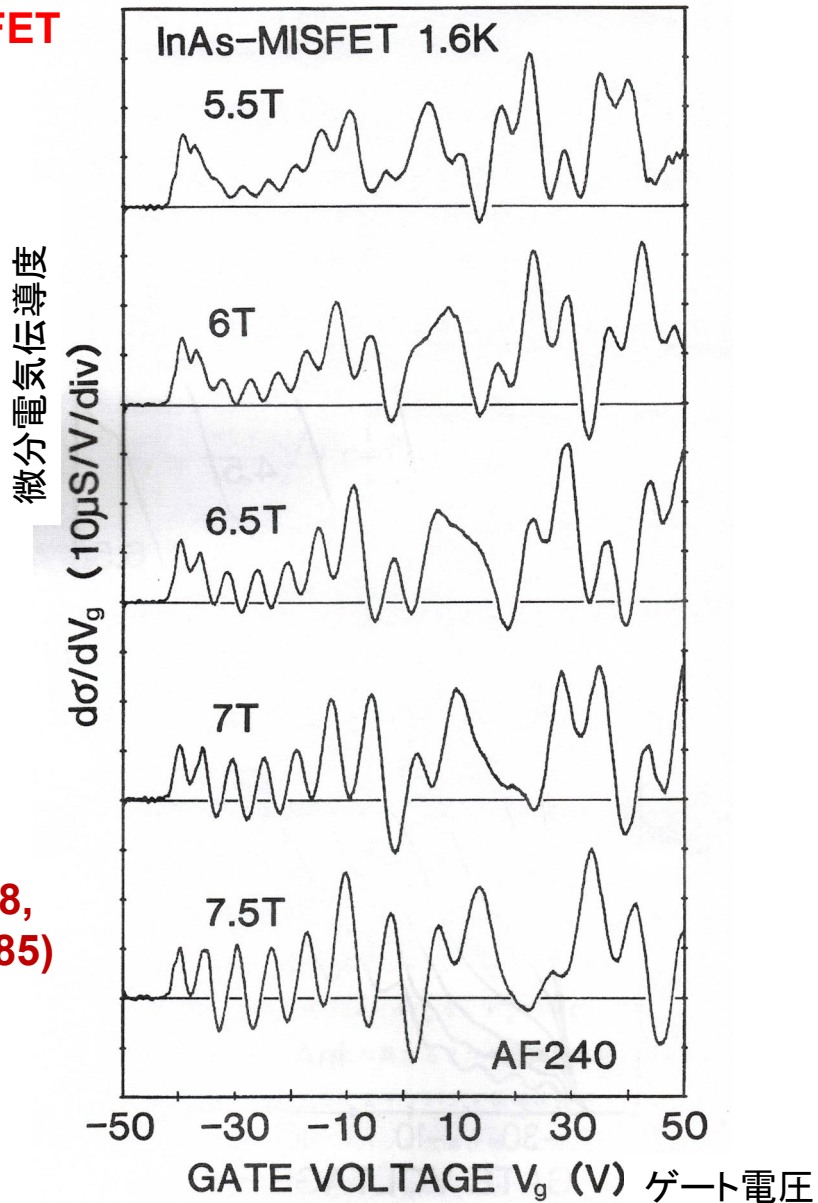
イオン注入装置のコントローラー  
→常温核融合で用いた

# 第2章 2次元電子系: 装置を自作, SdH効果を測定

InP-FET

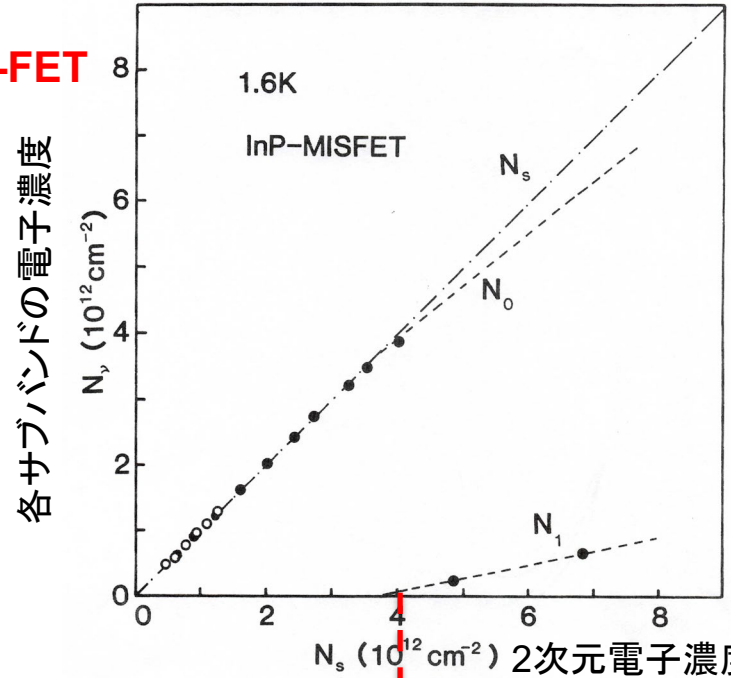


InAs-FET

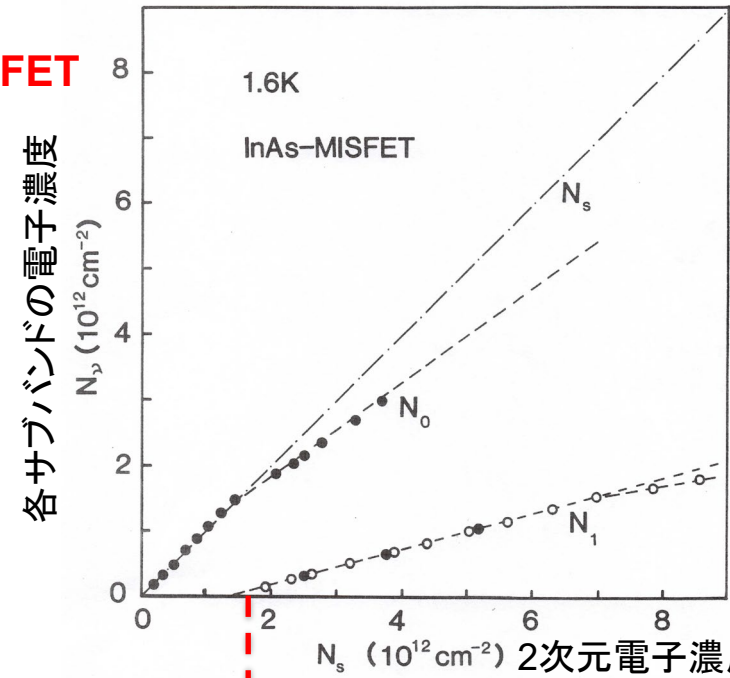


# 第2章 2次元電子系：モビリティ異常の正体を暴く

**InP-FET**

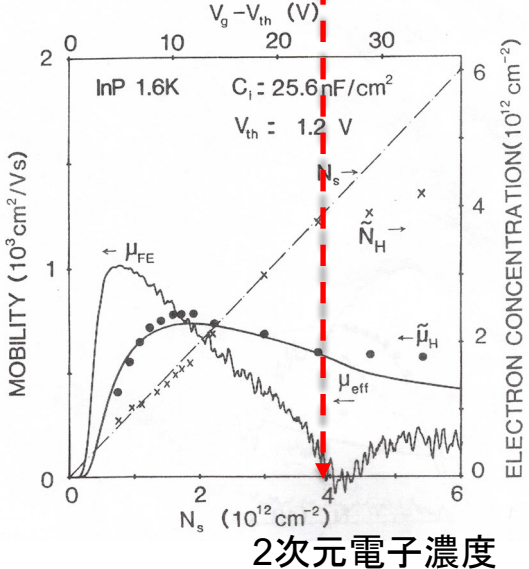


**InAs-FET**

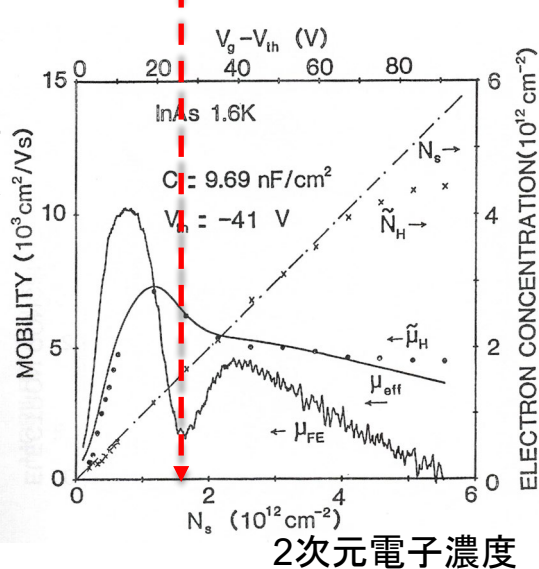


**EY, PRB 32, 8, 5280 (1985)**

**モビリティ**

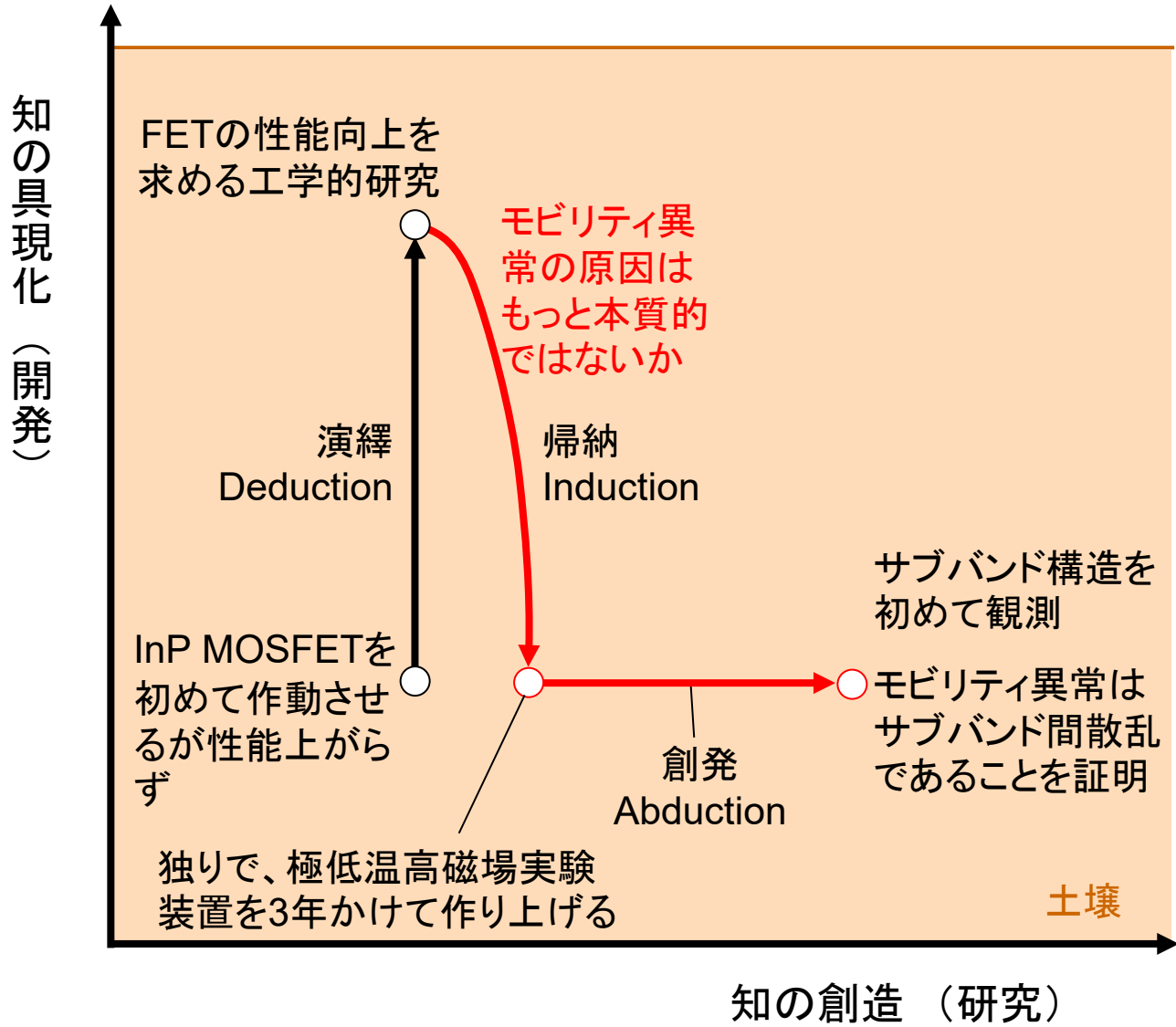


**モビリティ**



**モビリティ異常の正体はサブバンド間の電子散乱！**

# 第2章 2次元電子系：イノベーション・ダイアグラム



# 自己紹介 前半生(1977~1998)

- 1955年 福岡県福岡市に生まれる
- 1977年 東京大学理学部物理学科卒業
- 1979年 東京大学大学院理学系修士修了  
(24歳) 理学修士 (東京大学)
- 1979年 (24歳) NTT武蔵野通研に赴任
- 1984年 (29歳) 理学博士 (東京大学)
- 1984年から1985年まで (29-30歳)  
米国Notre Dame大学客員研究員
- 1986年 (31歳) NTT基礎研究所主任研究員
- 1990年 (35歳) NTT基礎研究所主幹研究員
- 1993年から1998年まで (38-43歳)  
仏国IMRA Europe招聘研究員

生命を物理学的に理解したかったが…時期尚早

第1章 アンダーソン局在における電子相関  
効果の理論的研究 (1977~1979)

FET研究チームに配属され、基礎研究を独りで始める

第2章 III-V族半導体における2次元電子系の  
実験的研究 (1979~1984)

グリーン関数法という強力な理論を学んで帰国

第3章 III-V族半導体におけるDXセンターの  
理論的研究 (1985~1990)

米国チームから闘いを挑まれ、それならば、と…

第4章 III-V族半導体におけるDXセンターの  
実験的研究 (1987~1992)

世界でたった一人、異常な現象を目の当たりにして…

第5章 常温核融合の研究 (1989~1998)

図書館からUniversity of Notre Dame  
のシンボルGolden Dome を望む



絵理を抱くボスのJohn D. Dow



David Frohlich, Sandy





住んでいたアパートの前で。物理学会に出発前。愛車は時速55マイルしか出なかった。 1985/03/23





出発後、高速道路上でトレーラー(2連のコンボイ)に追突されて、車は粉々に。 1985/03/25

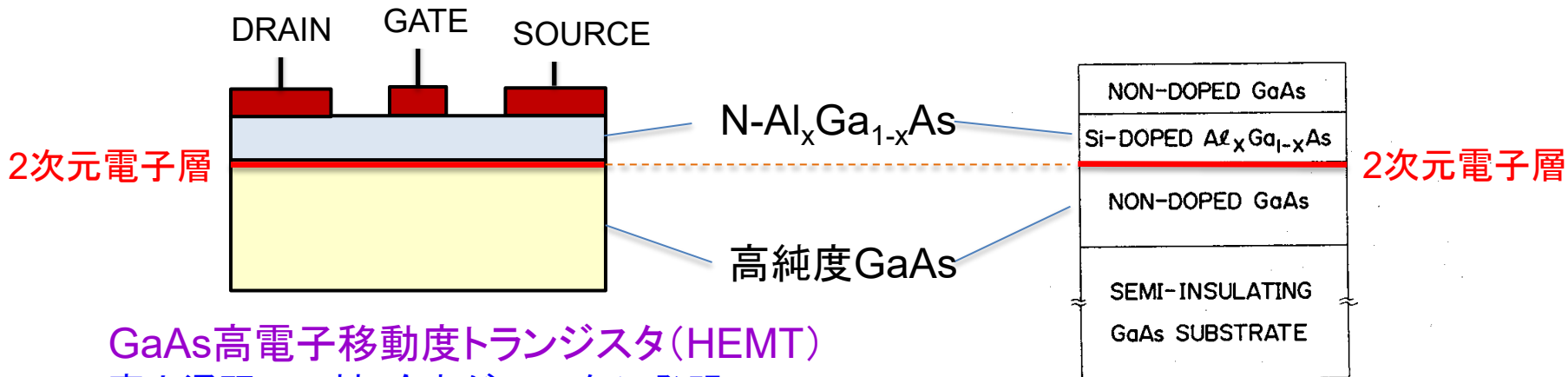


あこがれのAT&Tベル研の前で。

1985/10/20。この2か月後の 1986/01/28 に爆発したチャレンジャー号。



# 第3章 DXセンターの理論： ことの発端

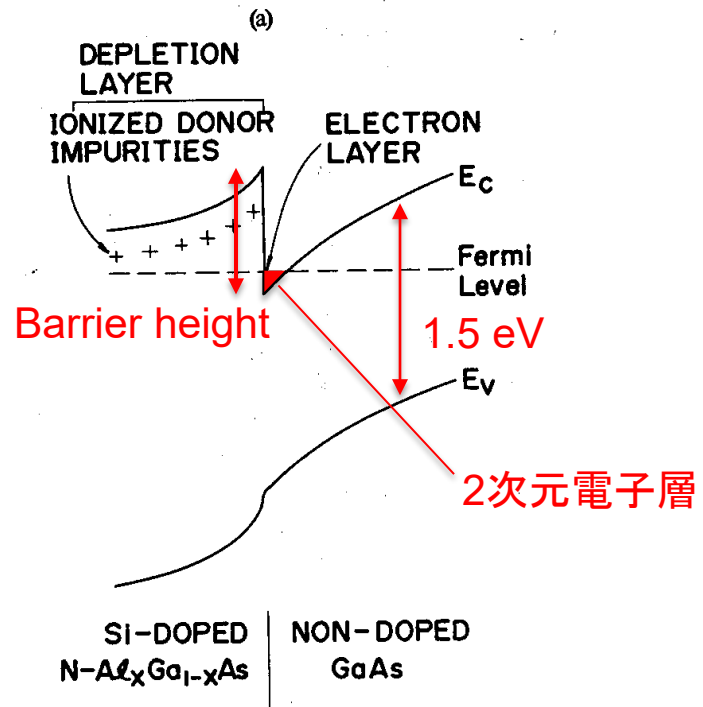


GaAs高電子移動度トランジスタ(HEMT)  
 富士通研の三村・冷水が1980年に発明  
 →携帯電話などマイクロ波通信の基盤技術

Barrier height(バンドギャップ)が大きければ  
 大きいほど、性能が高まる

そのためには、Alの濃度(x)を大きく(x=0.6程度)  
 にすれば良い。

ところが... xの値が0.3 を超えると、電子の  
 ふるまいが異常になる！



# 第3章 DXセンターの理論： 電子の異常とは？

Xの値が0.3を超えると、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ の中に未知の Deep Level (深い量子準位)が発生し、その深さ(伝導帯端から測ったエネルギー)が深くなる。



そのため、2次元電子がそこに捕獲されて HEMT性能が不安定化



その Deep Level (深い準位)は、ドナー不純物(Si)に起源をもつ。よって不可避。

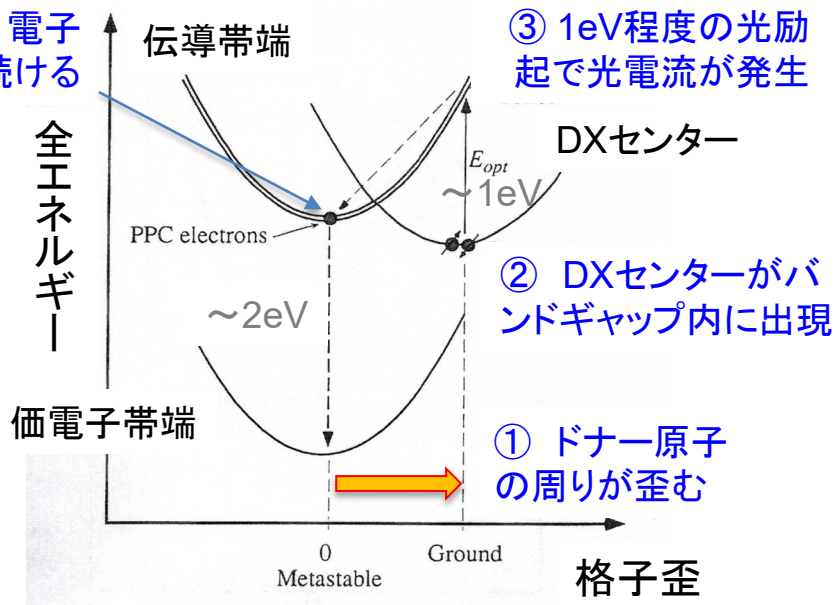


しかも、この Deep Level が出現すると、永続光電流(PPC)という不思議な現象が出現(バンドギャップより低く Deep Level のエネルギーよりずっと高いエネルギーの光をあてると2週間くらい光電流が流れ続ける)



ベル研の D.V. Lang 「ドナー原子(D)が未知の何か(X)と結びついて巨大格子歪み(LLR)をもたらす」というモデルを提案 → DXセンターと名付ける

## Lang の巨大格子歪(LLR)モデル



④ PPC: 電子が流れ続ける

③ 1eV程度の光励起で光電流が発生

② DXセンターがバンドギャップ内に出現

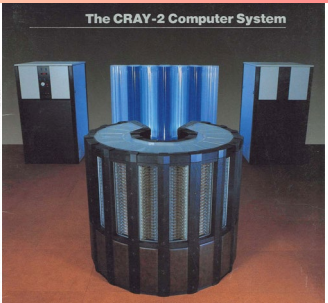
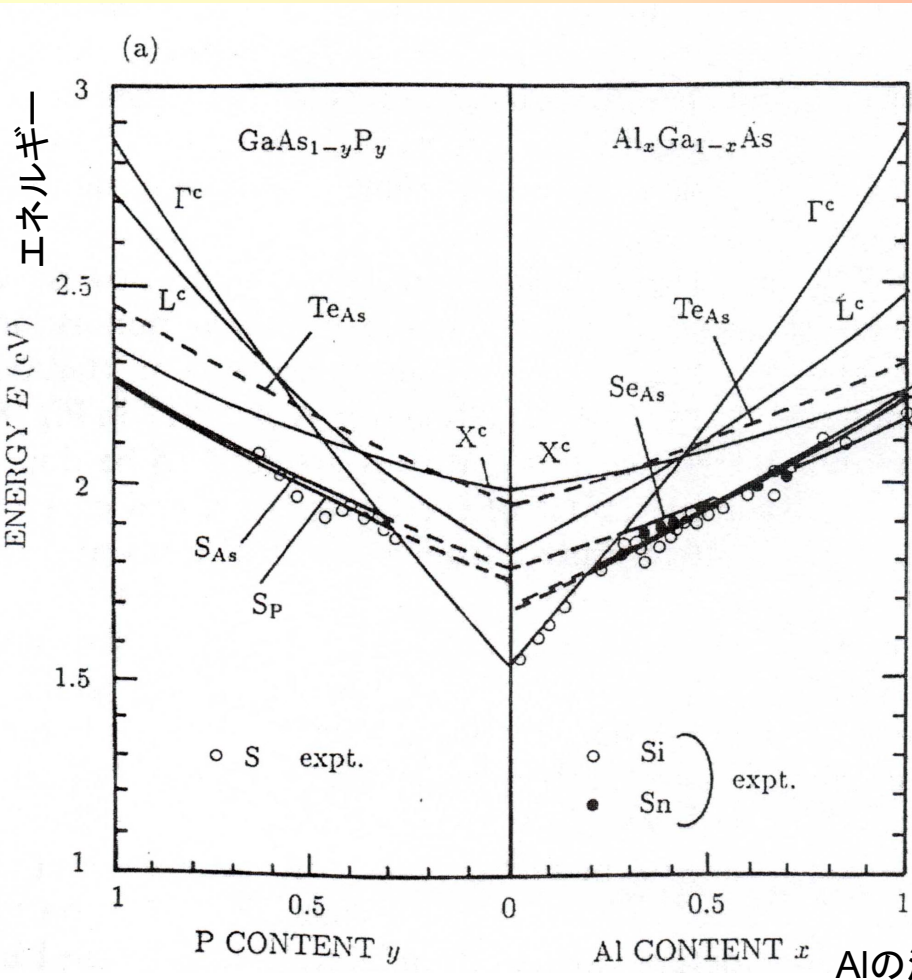
① ドナー原子の周りが歪む

### Anti-Thesis

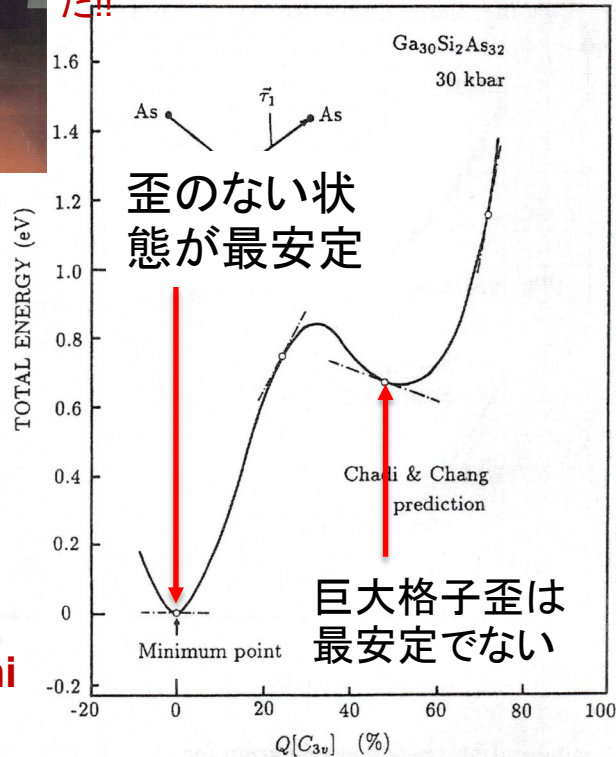
私は、その model が美しくない、と思った。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ のドナー原子に限って、格子歪をもたらす、なんて不自然。しかも Mizutaらによる EXAFS 実験は歪の存在を否定。

⇒どうするか？

# 第3章 DXセンターの理論： 定説は何か変だ



日米半導体摩擦によって、Cray-2をNTTが購入(1986)⇒この計算ができた!!



← EY, JPSJ 56, 8, 2835 (1987)

→ EY, Shiraishi & Ohno, JPSJ 60, 9, 2093 (1991)

Fig. 3. Total energy of  $\text{Ga}_{30}\text{Si}_2\text{As}_{32}$  (30 kbar) as a function of the movement  $Q[\text{C}_{3v}]$  of one Si.

Green関数法を用いて、Si, Sn 原子が生み出すDeep Level (s状態)を理論計算した。  
⇒ すると、実験をみごとに説明。

第一原理LDA法を用いて、さまざまな歪について、全エネルギーを理論計算した。  
⇒ 歪がない状態が最安定であることを証明。



# グリーン関数法とは何か？

## 完全結晶のSchrödinger方程式

$$\hat{H}_0 \psi_0 = E_0 \psi_0 \dots\dots\dots(1)$$

## 欠陥をもつ結晶のSchrödinger方程式

$$(\hat{H}_0 + \hat{V}) \Psi = E \Psi \quad \longrightarrow \quad (E - \hat{H}_0) \Psi = \hat{V} \Psi \dots\dots(2)$$

$$\therefore \Psi = \psi_0 + (E - \hat{H}_0)^{-1} \hat{V} \Psi \dots\dots\dots(3)$$

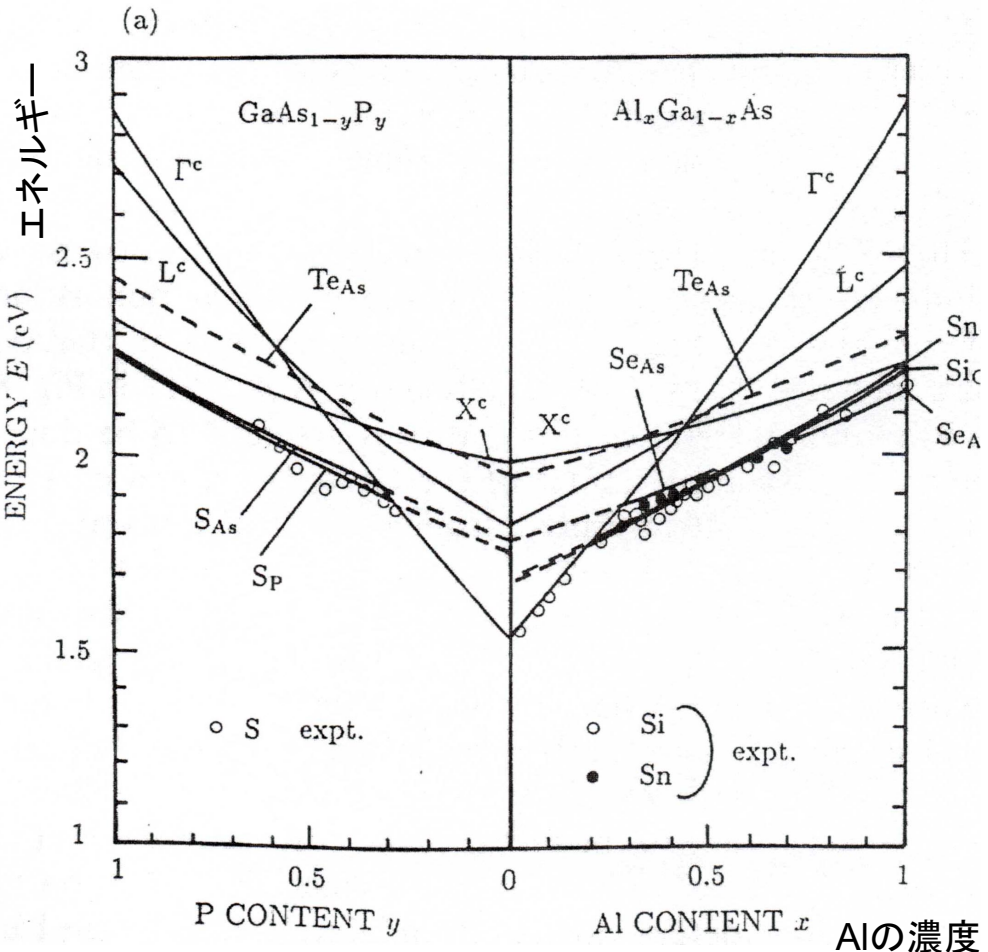
グリーン関数を  $\hat{G}_0(E) = (E - \hat{H}_0)^{-1}$  と定義すると、

$$\Psi = [1 - \hat{G}_0(E) \hat{V}]^{-1} \psi_0 \dots\dots\dots(4)$$

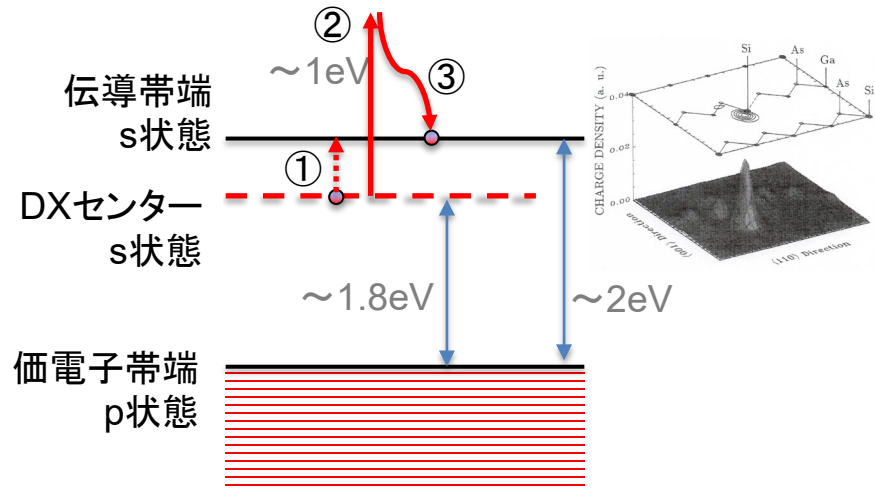
完全結晶のバンドギャップ内では  $\psi_0 = 0$  なので、

$$\det [1 - \hat{G}_0(E) \hat{V}] = 0 \dots\dots\dots(5)$$

# 第3章 DXセンターの理論：新しいモデルを提唱



## EYの微小格子歪(SLR)モデル



- ① DXセンターはs状態なので、s状態のみからなる伝導帯端には、光遷移できない(s→sは量子力学的に禁止)
- ② しかしにs状態のDXセンター電子は、p状態を含む伝導帯深くの量子準位に遷移できる ( $\sim 1\text{eV}$ )。
- ③ 伝導帯の深い量子準位に遷移した電子は、フォノンを出しながら緩和して伝導帯端に下り立つ。  
 →DXセンターは空だがs状態なので遷移が禁止。  
 →電子は伝導帯端にとどまって、PPC現象をもたらす。

Green関数法を用いて、Si,Sn 原子が生み出す深い準位 (s状態) を理論計算した。  
 ⇒ すると、実験をみごとに説明。

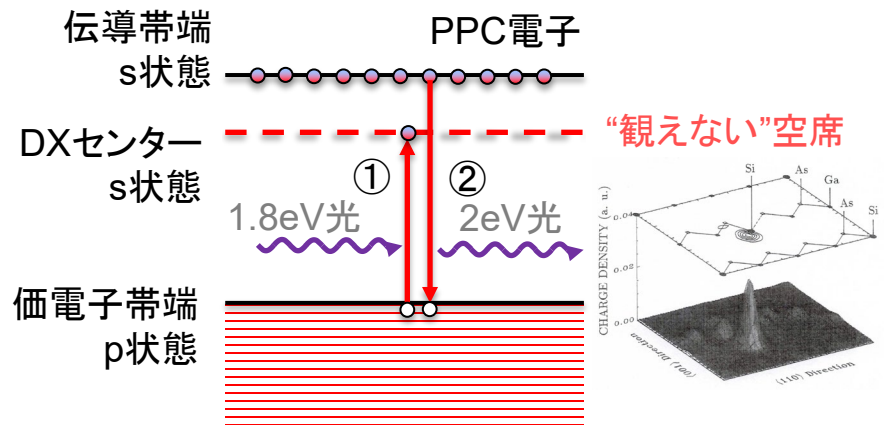


# 第4章 DXセンターの実験：米国との闘いに勝つ！

ところが...

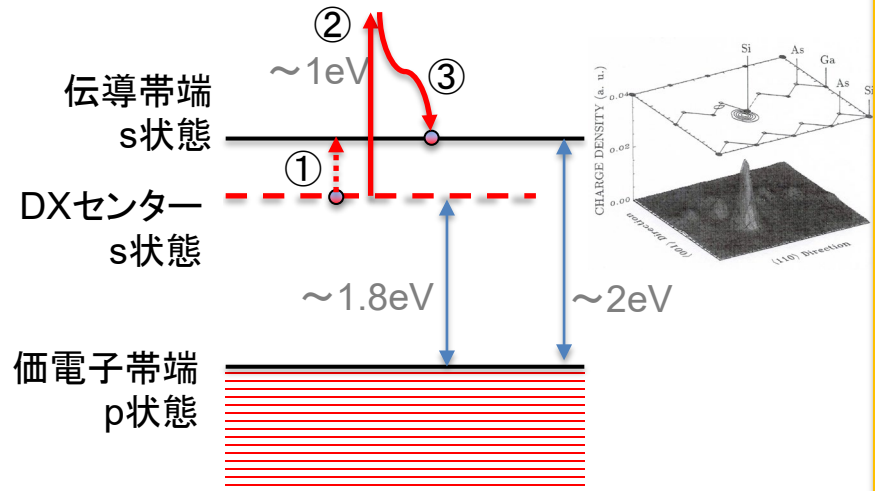
米国チームは、Lang Model に固執。  
 欧州チームは、EY Model を指示。

それならば...と、  
 奇想天外な実験を思いついた。



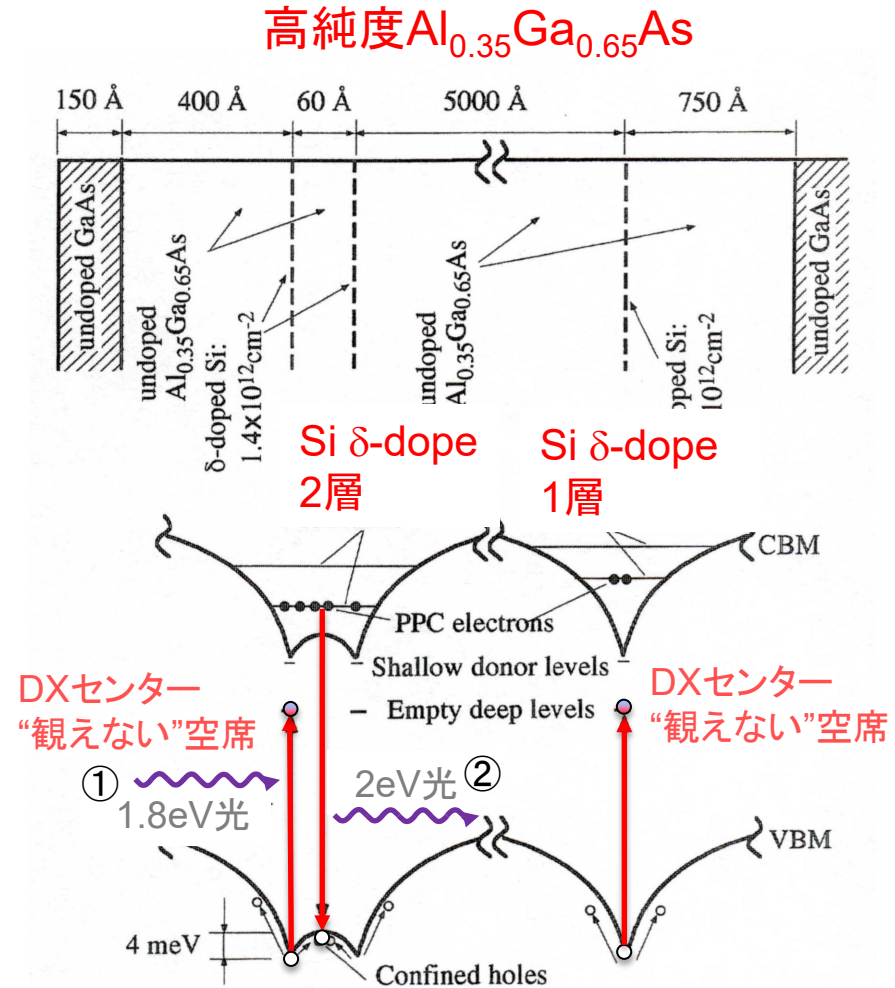
- ① s状態で“観えない”空席(DXセンター)に向かって、1.8eVの光を入射し、価電子帯端のp電子をDXに入れる。
- ② すると生成された価電子帯の正孔(hole)に向かって、価電子帯端のs電子は、2.0 eVの光を捨てながら落ち込む。
- ③ つまり、1.8eVの低エネルギーの光を入れると、2.0eVの高エネルギーの光が出てくる=Anti-Stokes PL

## EYの微小格子歪(SLR)モデル



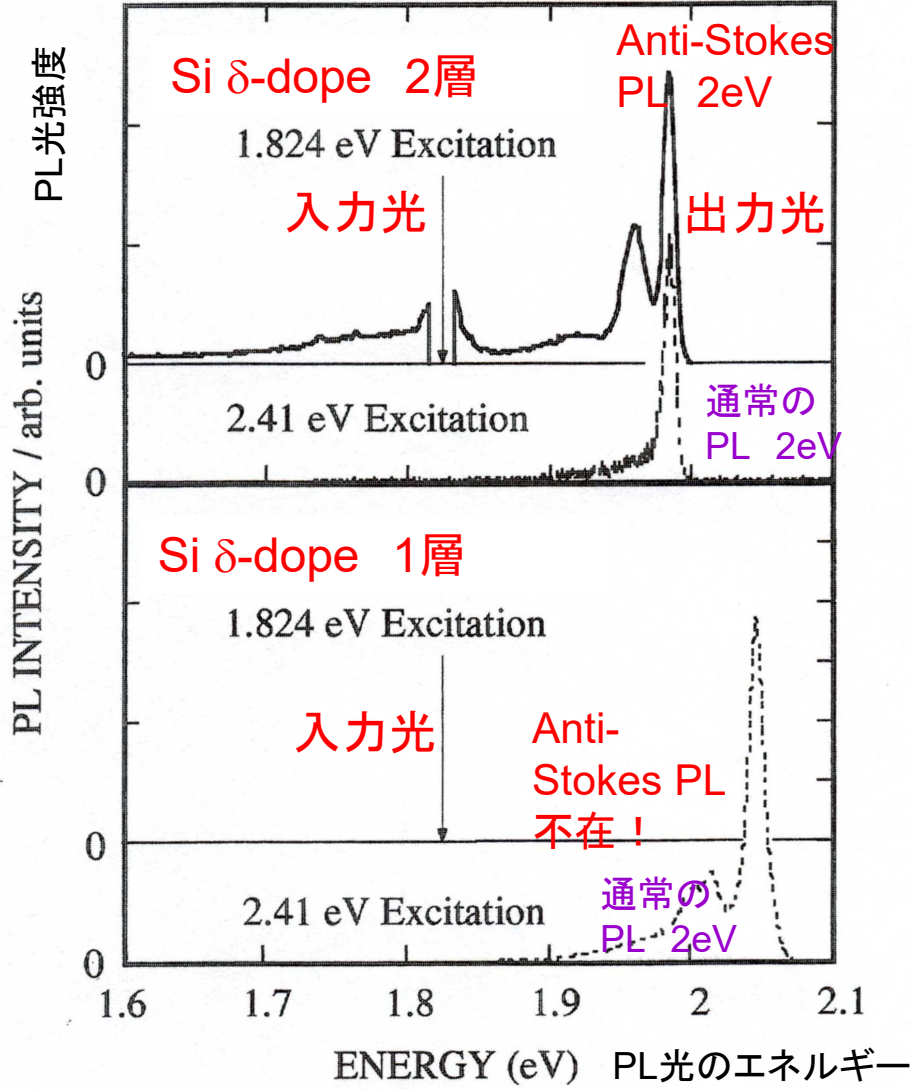
- ① DXセンターはs状態なので、s状態のみからなる伝導帯端には、光遷移できない(s→sは量子力学的に禁止)
- ② しかしにs状態のDXセンター電子は、p状態を含む伝導帯深くの量子準位に遷移できる (~1eV)。
- ③ 伝導帯の深い量子準位に遷移した電子は、フォノンを出しながら緩和して伝導帯端に下り立つ。  
 →DXセンターは空だがs状態なので遷移が禁止。  
 →電子は伝導帯端にとどまって、PPC現象をもたらす。

# 第4章 DXセンターの実験: 低エネから高エネを創る

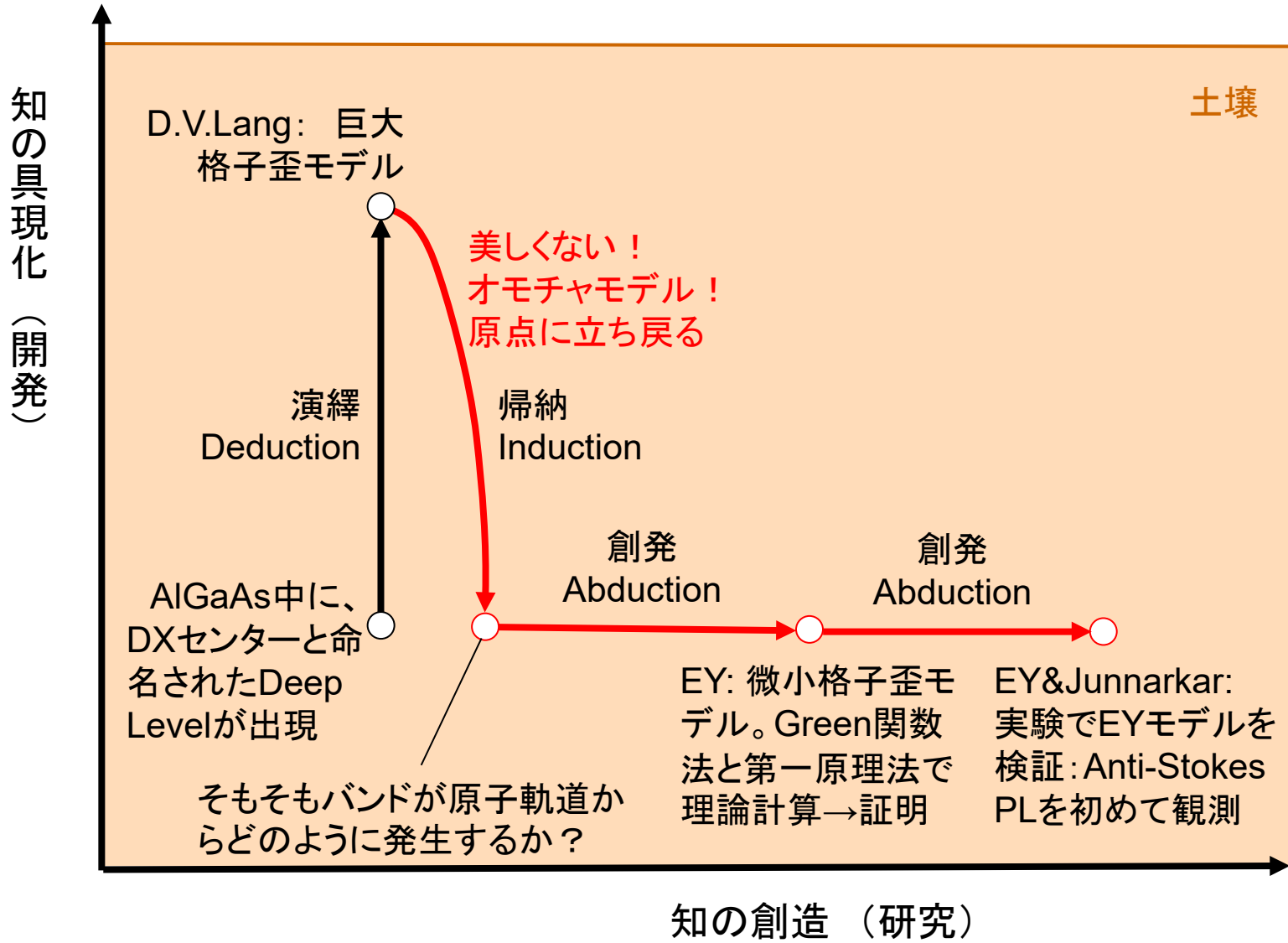


生成正孔は2つの $\delta$ -dopeの間にできた量子井戸に局在  
 ⇒ ②の出力光あり

1つの $\delta$ -dopeでは価電子帯に量子井戸ができず、生成正孔は拡散してしまう  
 ⇒ ②の出力光なし



# 第3,4章 DXセンター：イノベーション・ダイアグラム



# 自己紹介 前半生(1977~1998)

1955年 福岡県福岡市に生まれる  
1977年 東京大学理学部物理学科卒業  
1979年 東京大学大学院理学系修士修了  
(24歳) 理学修士 (東京大学)

1979年 (24歳) NTT武蔵野通研に赴任  
1984年 (29歳) 理学博士 (東京大学)

1984年から1985年まで (29-30歳)  
米国Notre Dame大学客員研究員

1986年 (31歳) NTT基礎研究所主任研究員

1990年 (35歳) NTT基礎研究

1993年から1998年まで (38-  
43歳) 仏国IMRA Europe招

1993/04



生命を物理学的に理解したかったが…時期尚早

第1章 アンダーソン局在における電子相関  
効果の理論的研究 (1977~1979)

FET研究チームに配属され、基礎研究を独りで始める  
第2章 III-V族半導体における2次元電子系の  
実験的研究 (1979~1984)

グリーン関数法という強力な理論を学んで帰国  
第3章 III-V族半導体におけるDXセンターの  
理論的研究 (1985~1990)

米国チームから闘いを挑まれ、それならば、と…  
第4章 III-V族半導体におけるDXセンターの  
実験的研究 (1987~1992)

世界でたった一人、異常な現象を目の当たりにして…  
第5章 常温核融合の研究 (1989~1998)

# 第5章 常温核融合：ことの発端

—1989年7月4日

中性子(3回)の発生と同時に、真空装置のインターロックが作動(すなわち過剰熱同時発生による吸蔵重水素の脱蔵)

Pd表面に蒸着していたAuが溶ける(=800°C以上に温度上昇)。

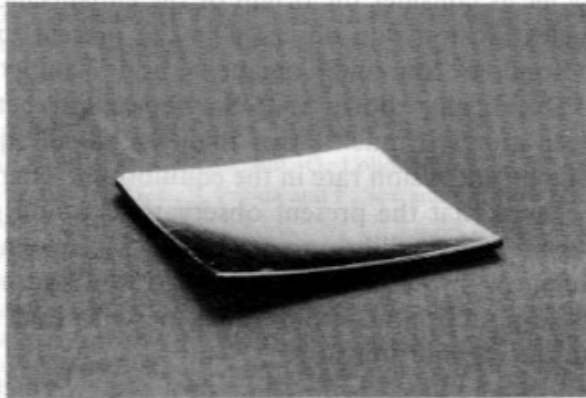
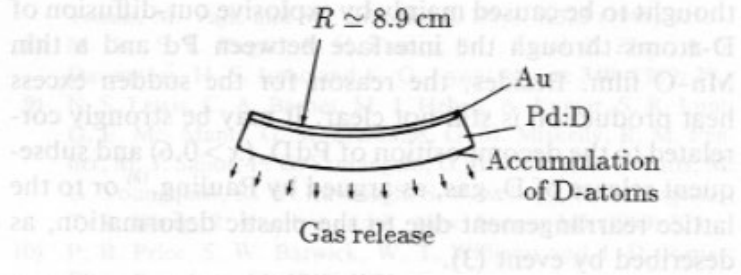


Fig. 2. A 3.0 cm × 3.0 cm palladium sample (thickness = 1.0 mm) after the third neutron burst and explosive release of D<sub>2</sub> gas. Top side is Au-coated surface at which alloying occurred after the first neutron emission.

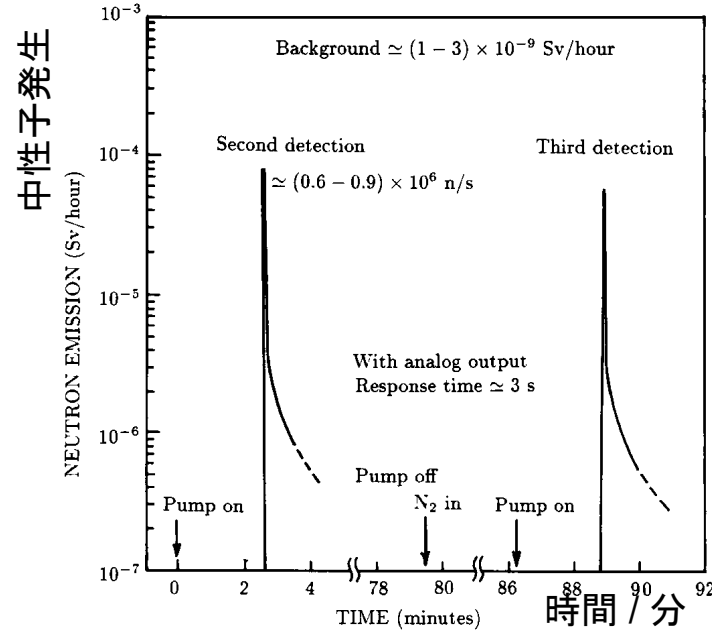
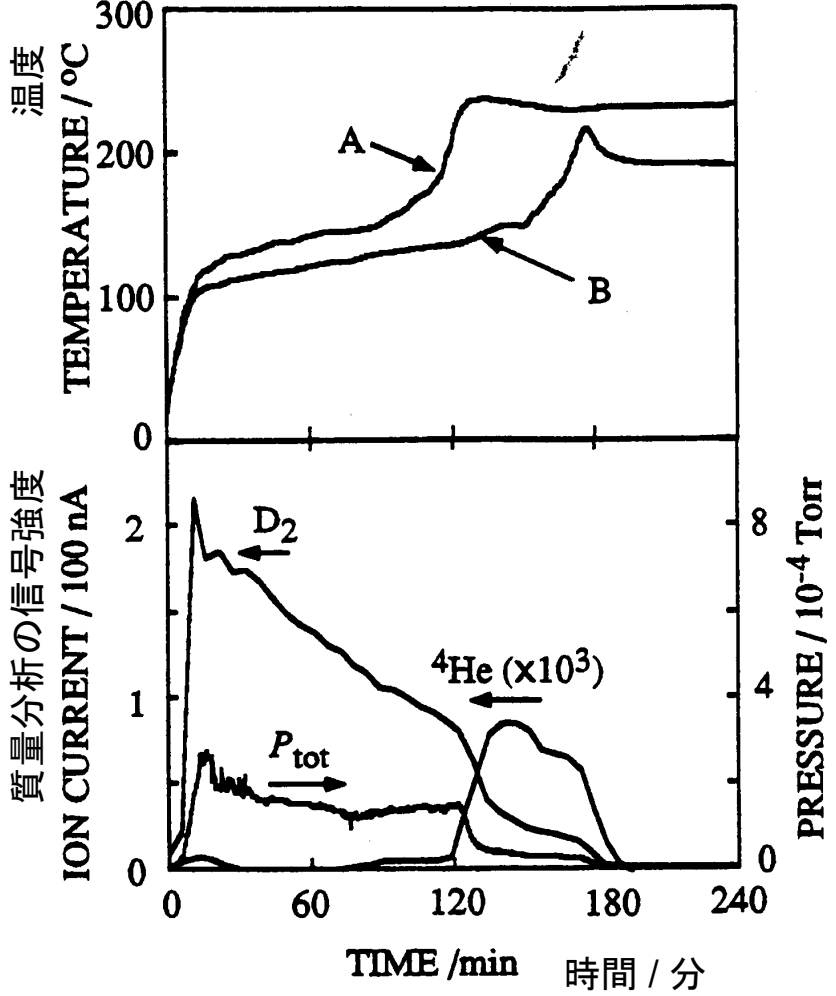
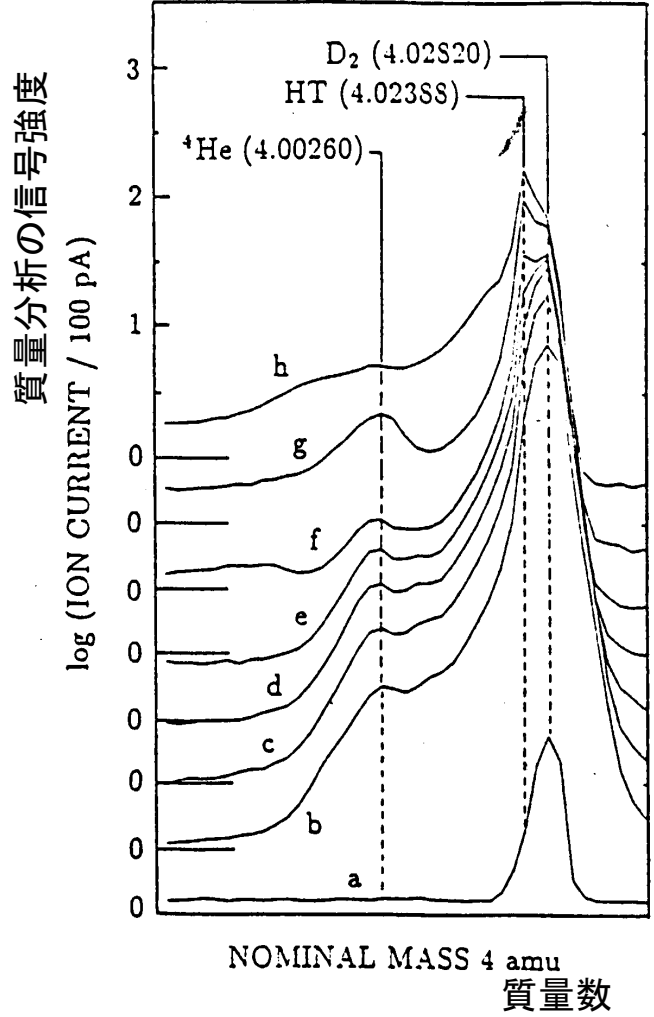


Fig. 3. The second and third neutron emissions as a function of time. The tailing behaviour after the neutron is detected is of no significance; it is only a characteristic of the analog output of the device.

# 第5章 常温核融合: Heと過剰熱の同期発生を観測

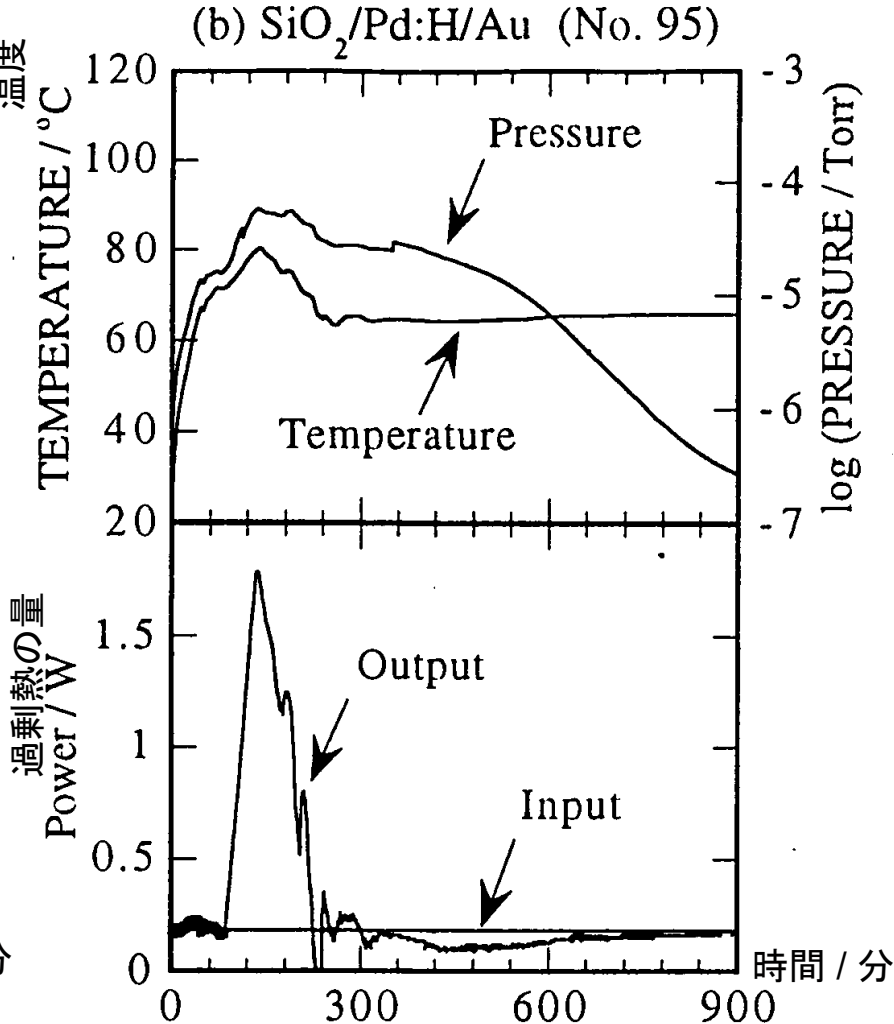
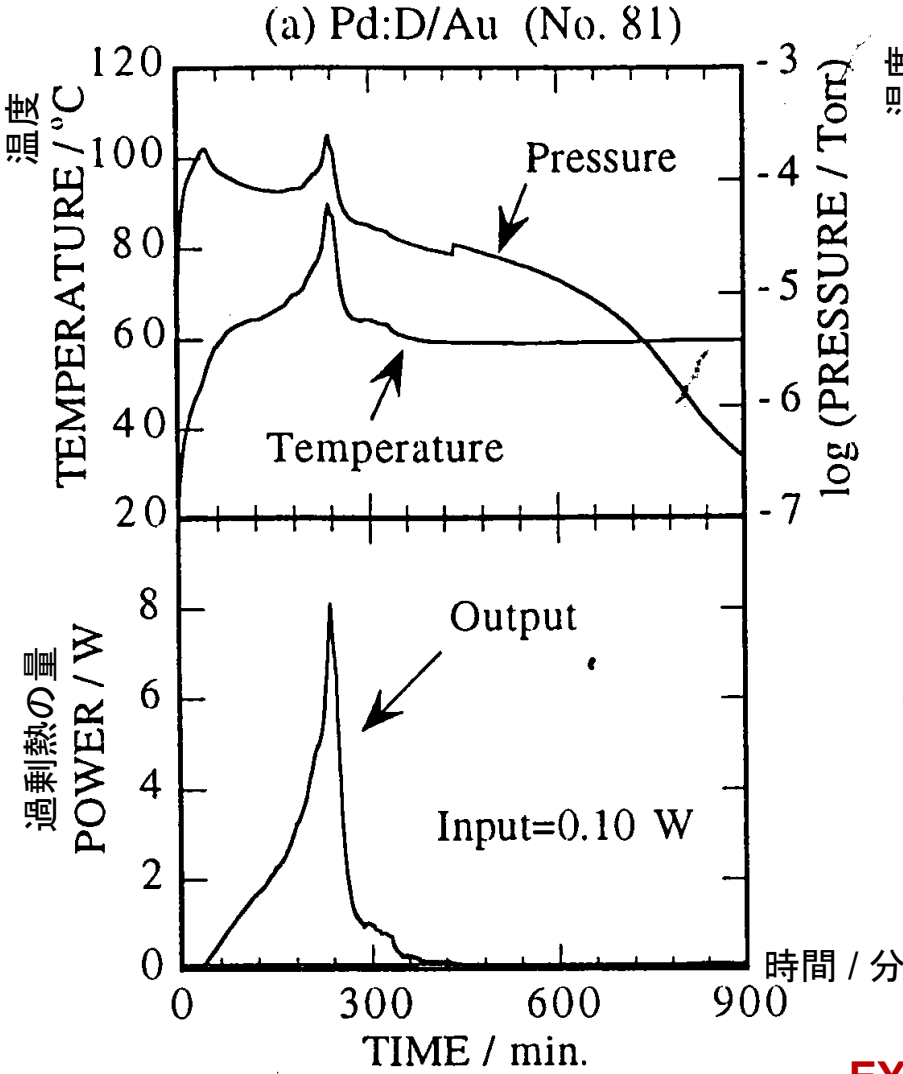
真空法でHe-4の生成を、  
real timeで初めて観測

真空法による過剰熱発生と  
He-4の生成



# 第5章 常温核融合: 南仏にて、過剰熱条件を発見

—Pd板の塑性変形を妨げることにより、過剰熱が増大することを発見。





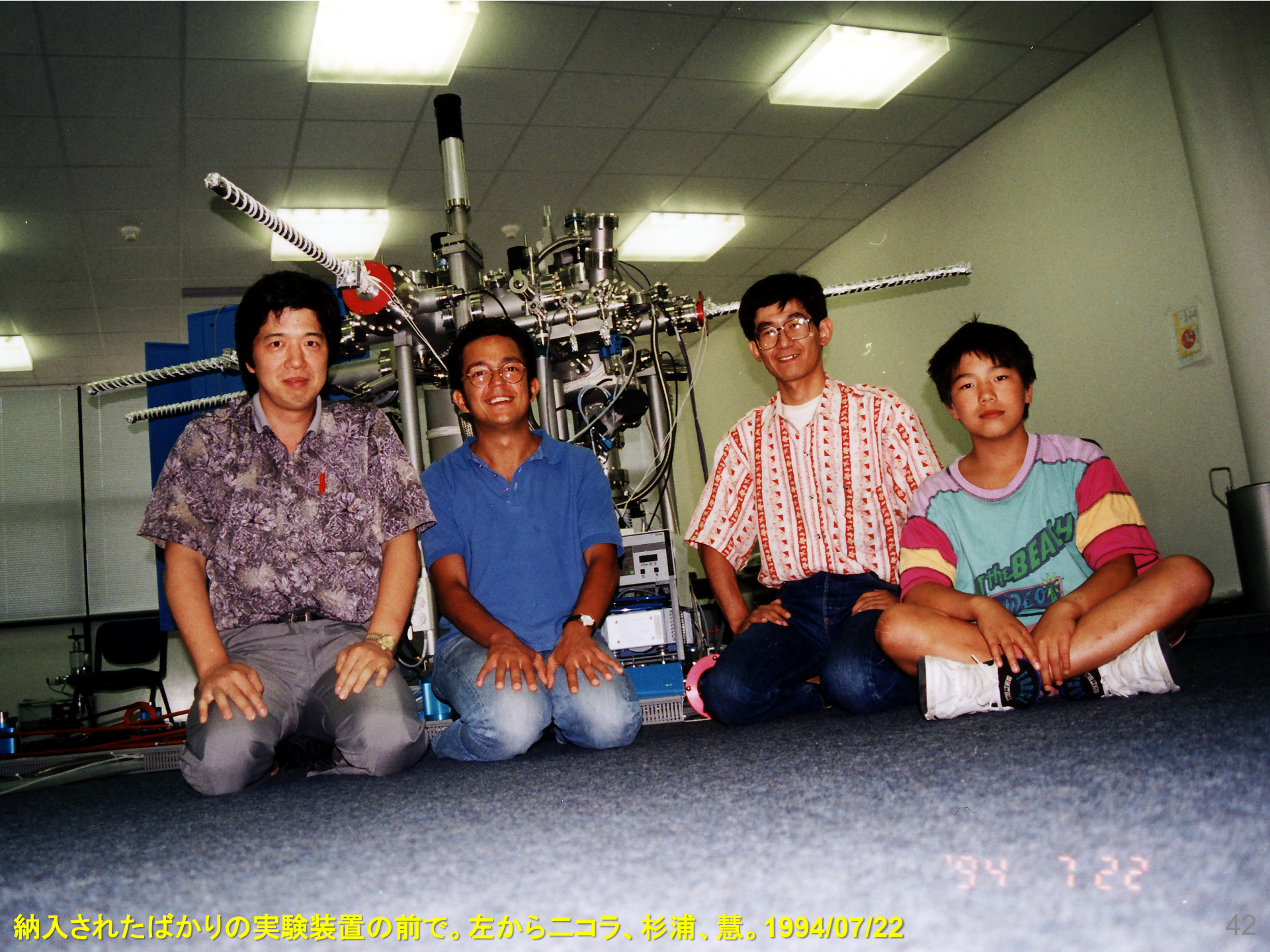
左から、マーティン・フライシュマン、その孫、スタンレー・ポンス。1994/08/06





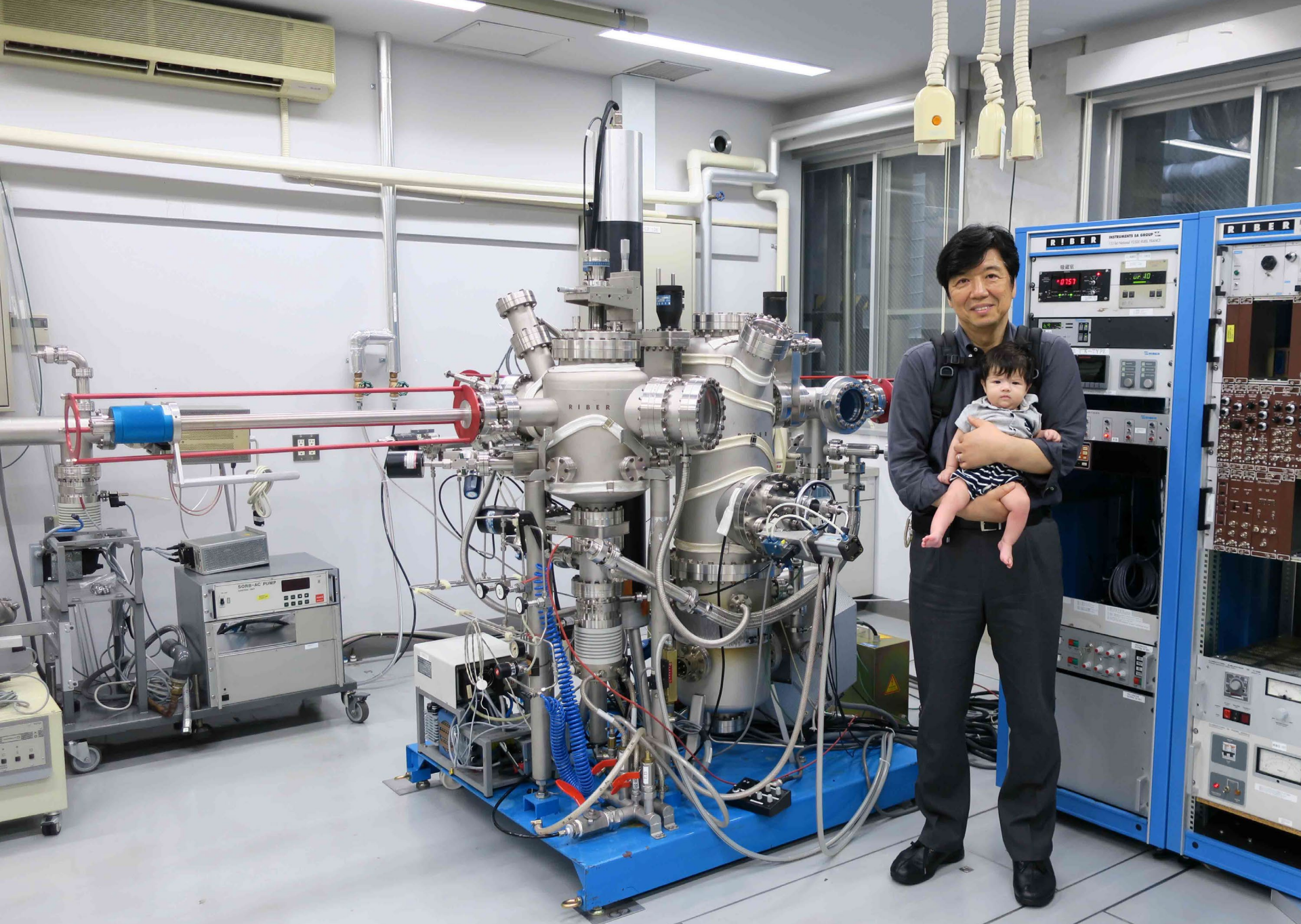
94.12.3

我が家。1994/12/03



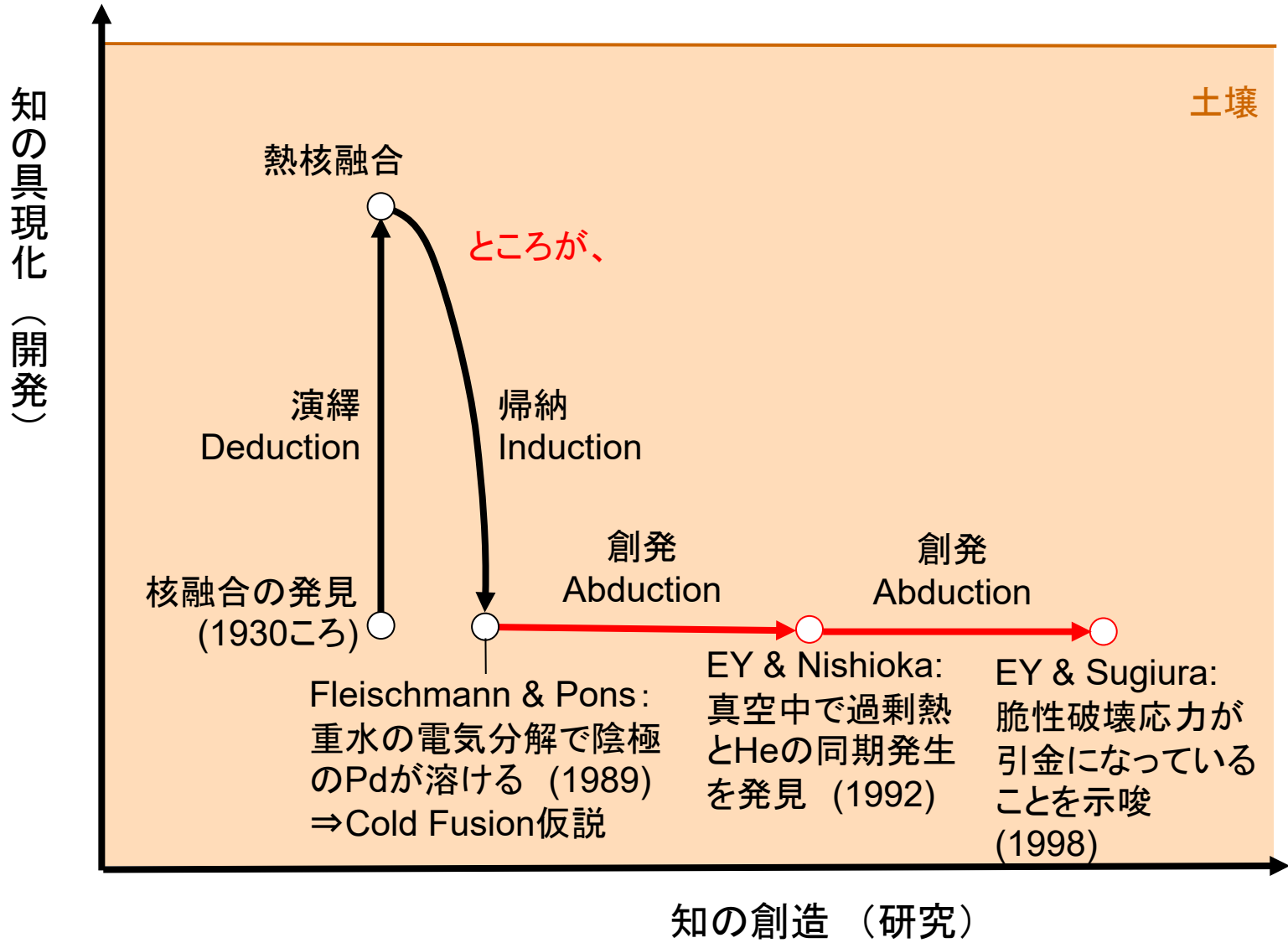
194 7.22

納入されたばかりの実験装置の前で。左からニコラ、杉浦、慧。1994/07/22



フランス・ソフィアアンティポリスで創り上げた実験装置(1994)

# 第5章 常温核融合：イノベーション・ダイアグラム



これから： ひつまぶし人生第3部（2021～ ）