

初めて語ること —私のパラダイム破壊

京都大学 山口栄一最終講義

2020年3月13日(金) 15:00～16:30

京都大学百周年時計台記念館2階

国際交流ホールⅡ・Ⅲ

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…

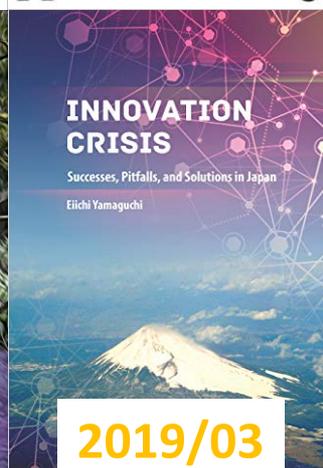
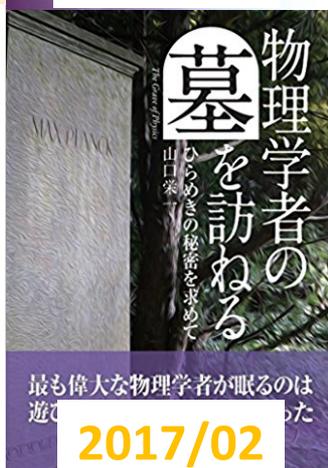
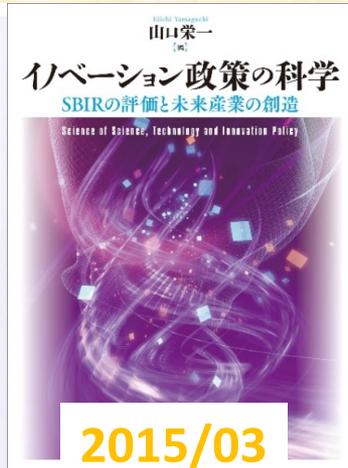
第5章 常温核融合の研究 (1989~1998)

自己紹介 後半生(1998~2020)

- 1998年 (43歳) (株)アークゾーンを起業
- 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
- 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
- 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

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)



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)

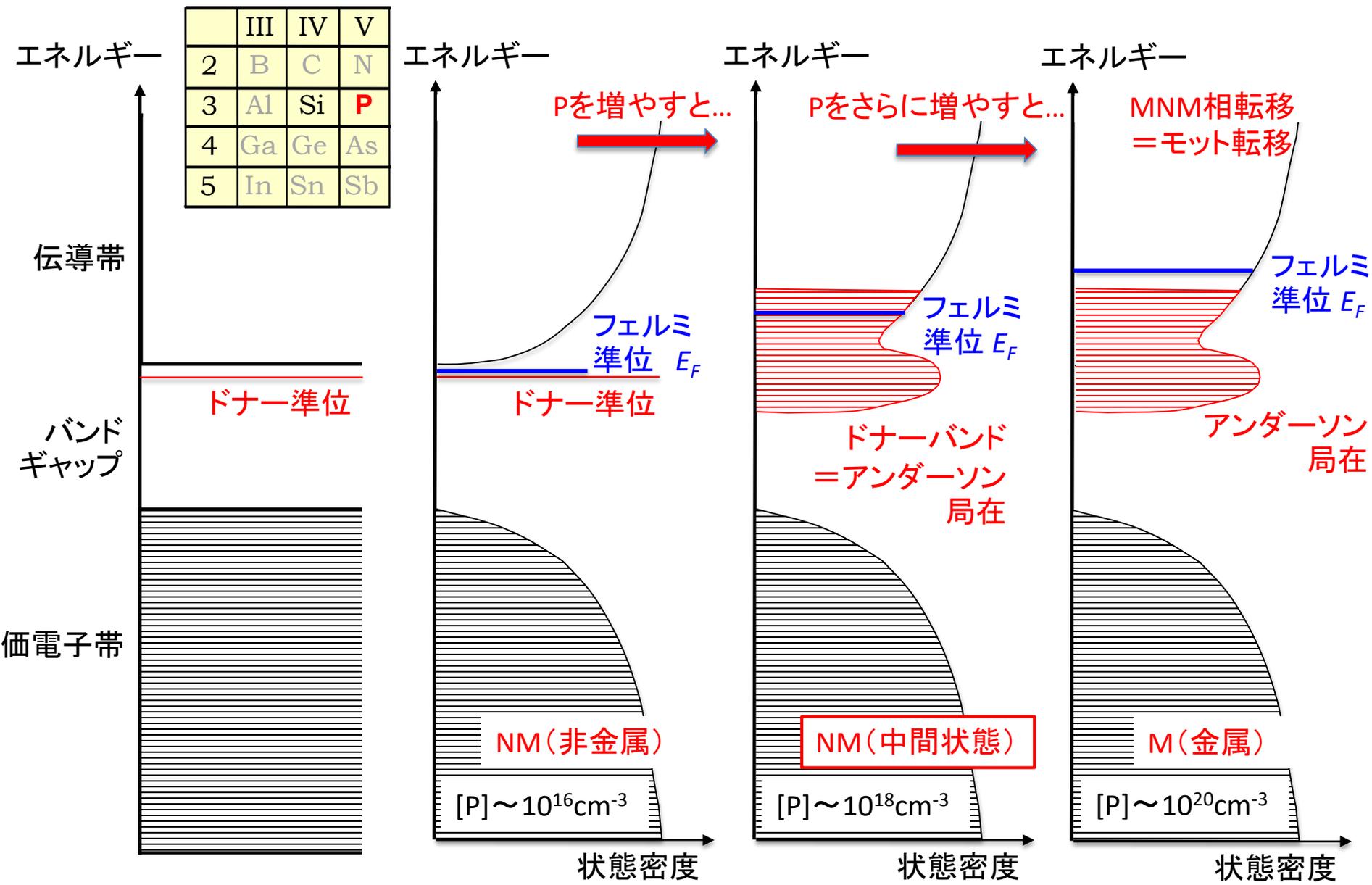
米国チームから闘いを挑まれ、それならば、と…

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 $M = \chi H$

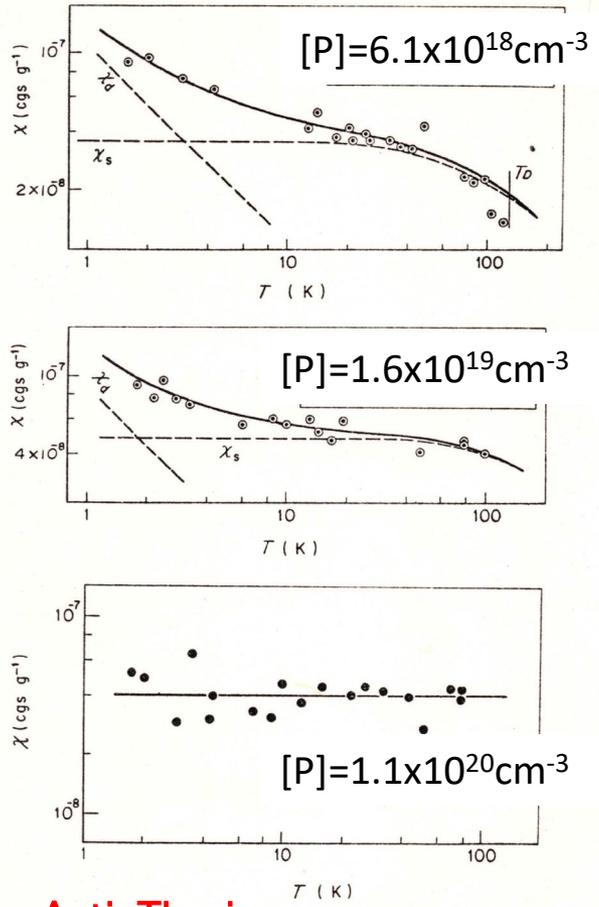
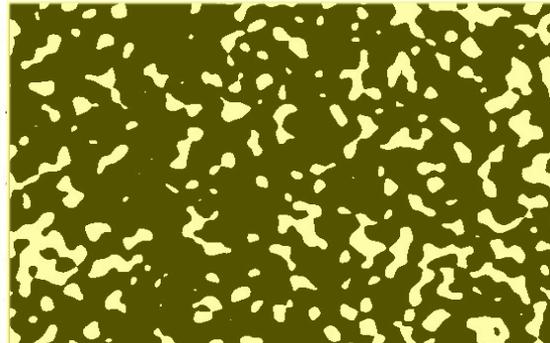
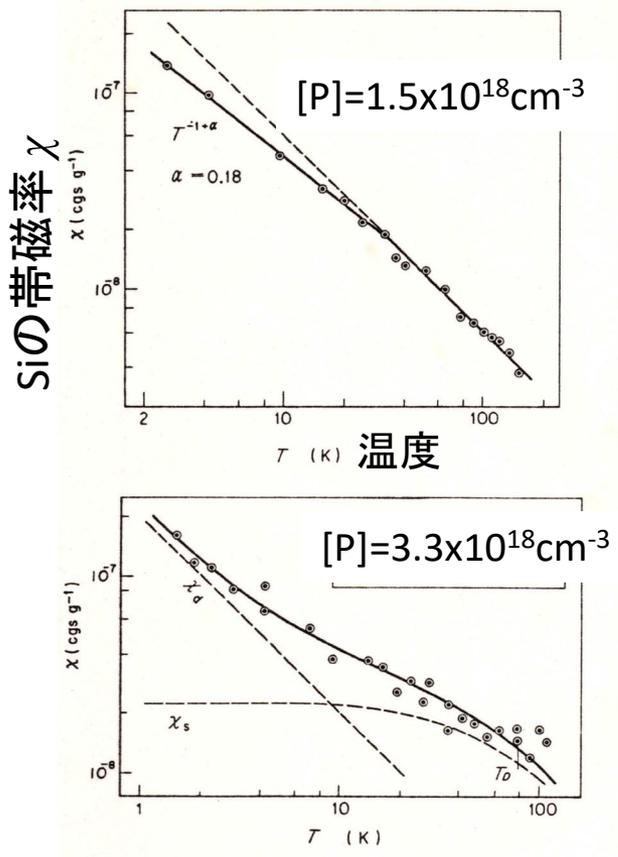
Ue & Maekawa:
PRB 3, 4232 (1971)

Si:Pの帯磁率 χ

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

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

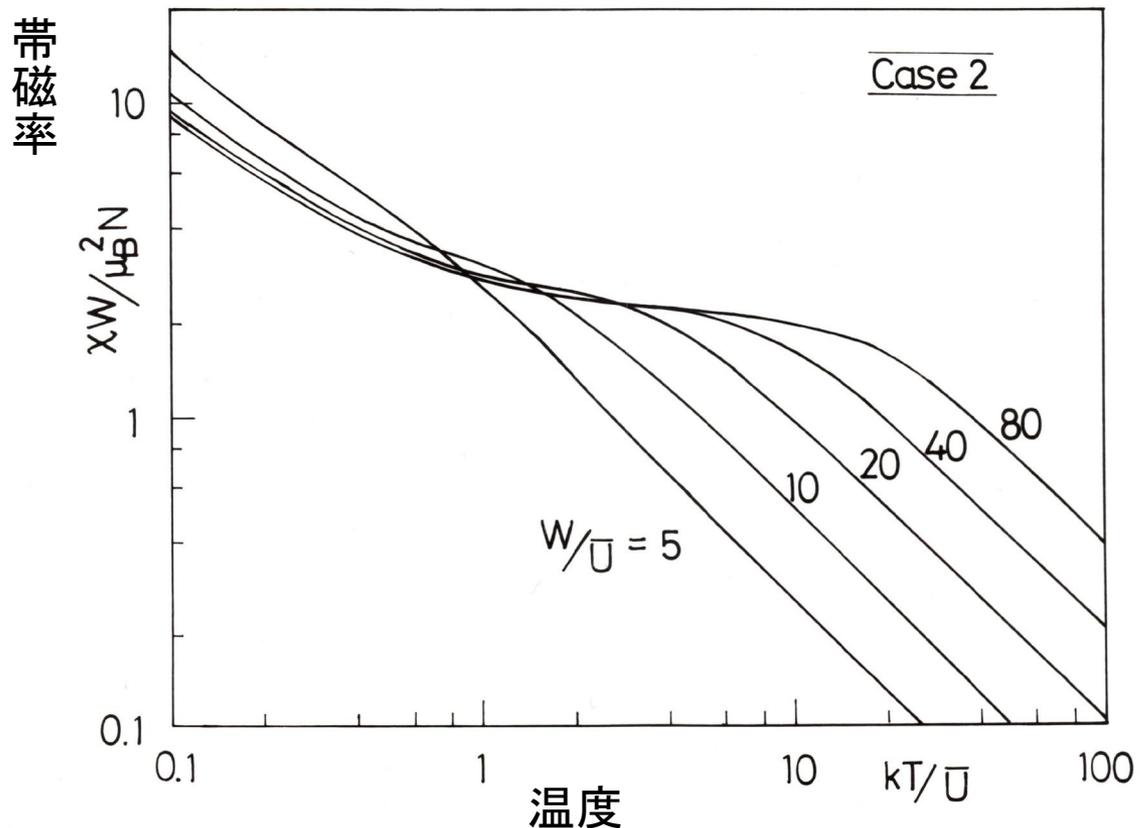
$$\varepsilon_{\alpha} = \text{アンダーソン局在 } \alpha, \quad U_{\alpha} = \alpha \text{ における電子相関}$$

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！

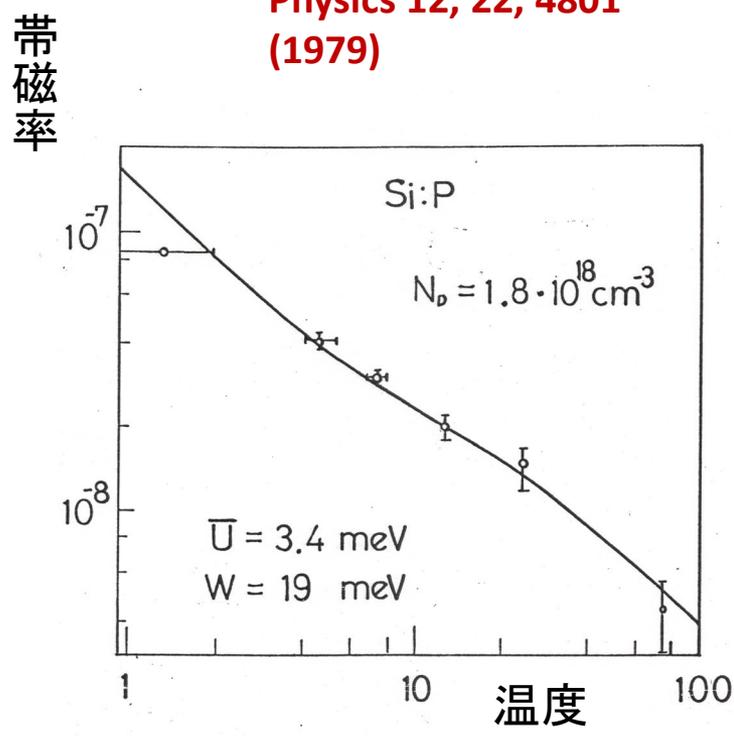
$$\text{帯磁率} \quad \chi = \frac{2\mu_B^2}{kT} \sum_{\alpha} \frac{1}{2 + e^{(E_F - \varepsilon_{\alpha} - U_{\alpha})/kT} + e^{-(E_F - \varepsilon_{\alpha})/kT}}$$

第1章 アンダーソン局在：すべての実験を説明

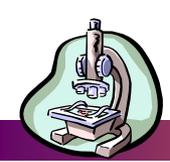
- 帯磁率：Ue & Maekawaの実験をみごとに説明



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。

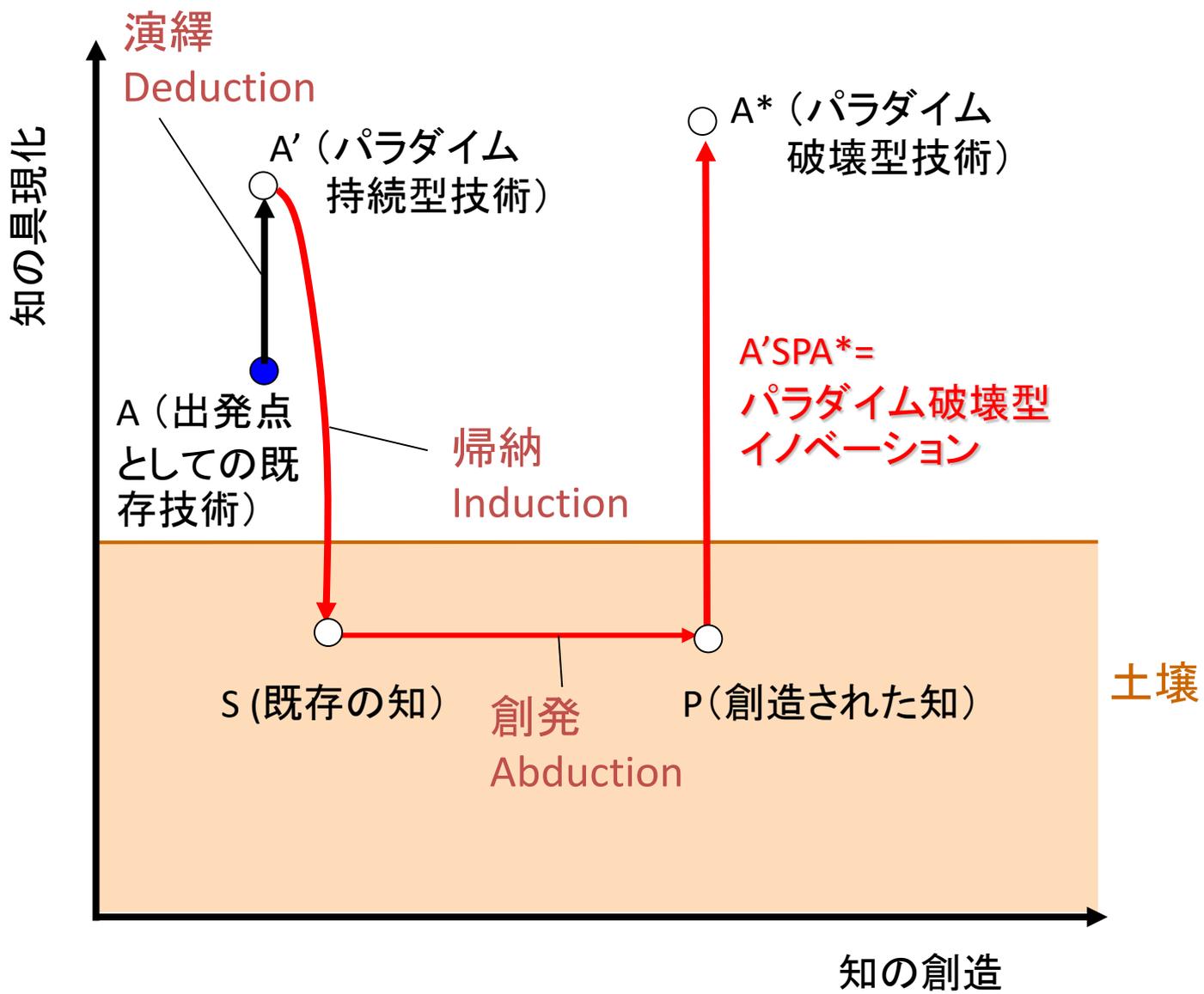
「帰納はなんら新しい観念を生み出すことはできない。同様に演繹にもできない。科学の諸観念はすべて創発Abductionによってもたらされる」

Charles S. Peirce (1965):

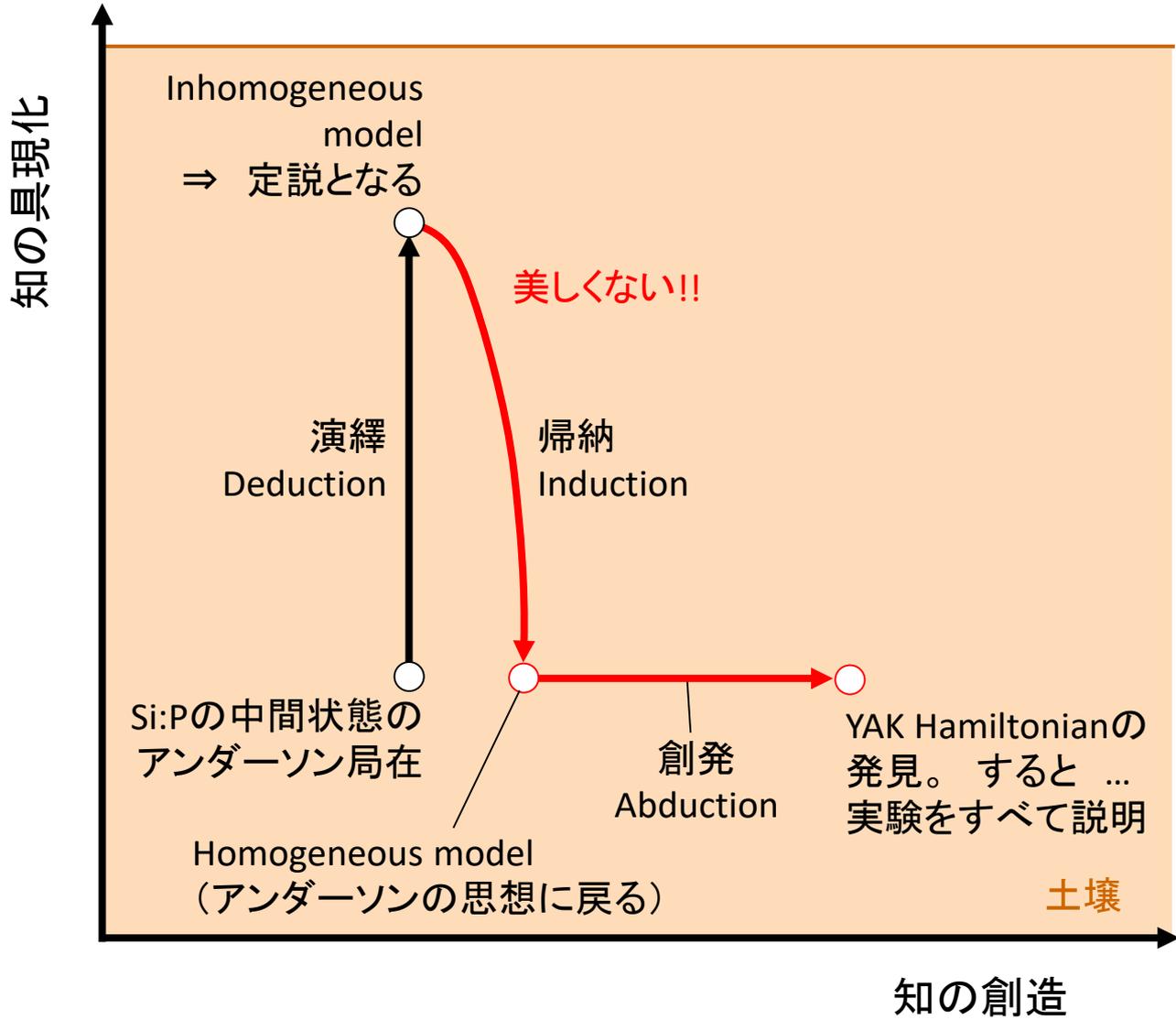
Collected Papers of Charles Sanders Peirce, Belknap Press.



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)

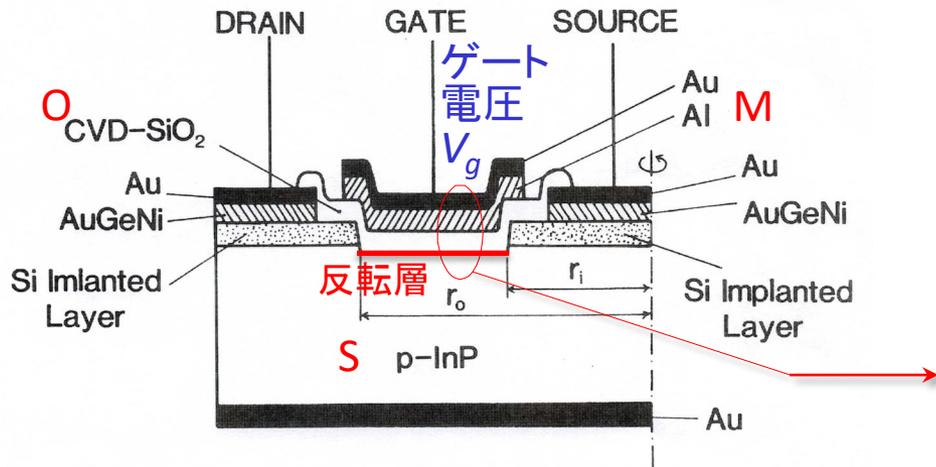
世界でたった一人、異常な現象を目の当たりにして…

第5章 常温核融合の研究 (1989~1998)

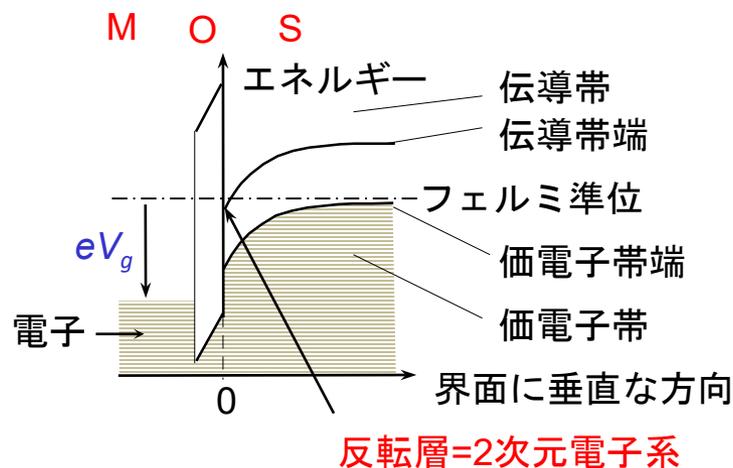
第2章 2次元電子系： ことの発端

電子速度 $v = \mu E$

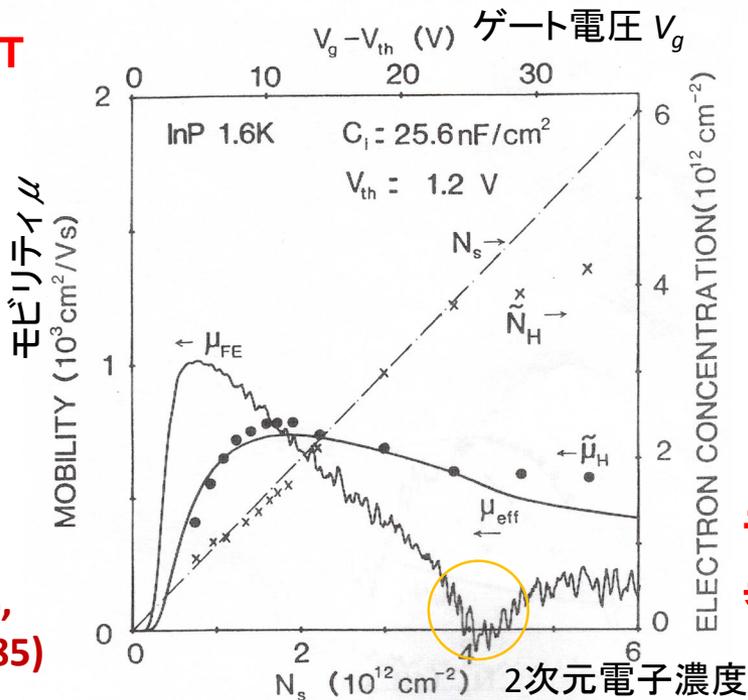
InP-MOSFET



エネルギー図

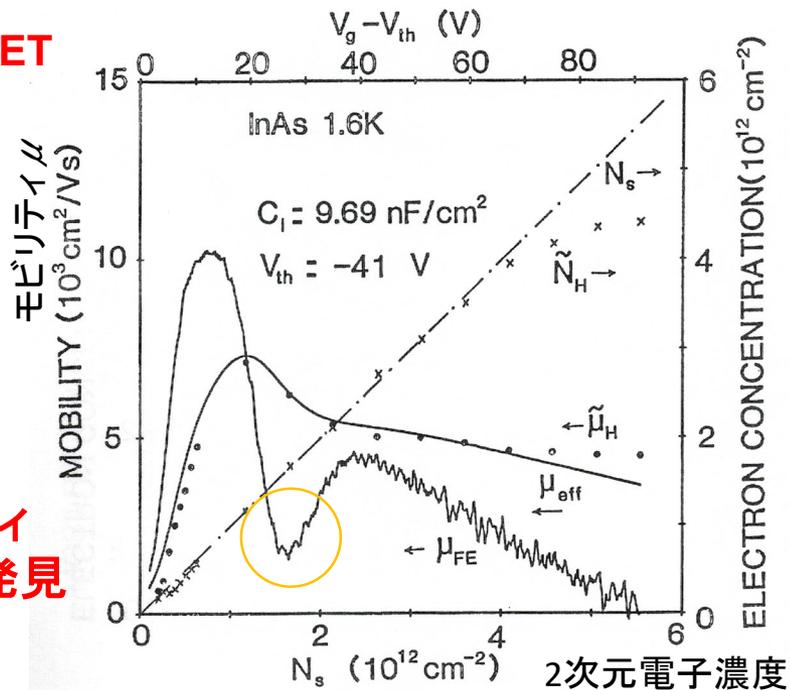


InP-FET



InAs-FET

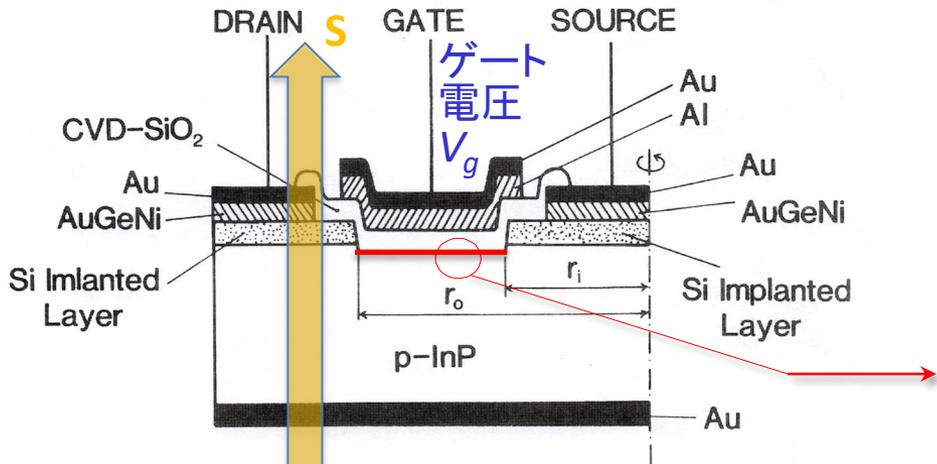
モビリティ異常を発見



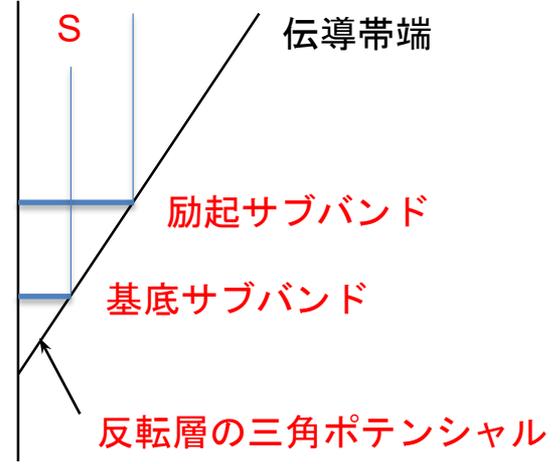
EY,
PRB 32, 8,
5280 (1985)

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



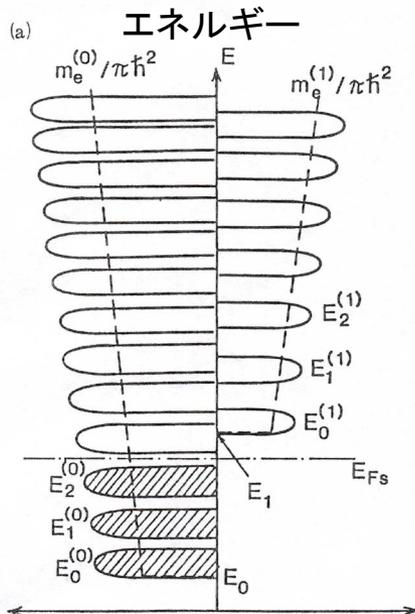
垂直磁場Hを
かけると...



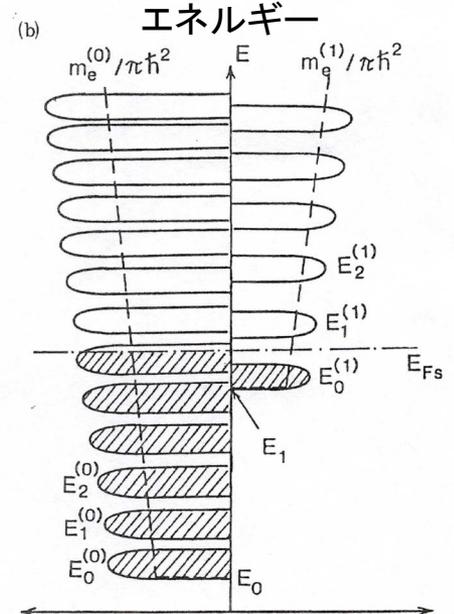
2次元電子が層内で回転を
始めて0次元状態になる
⇒ランダウ準位



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



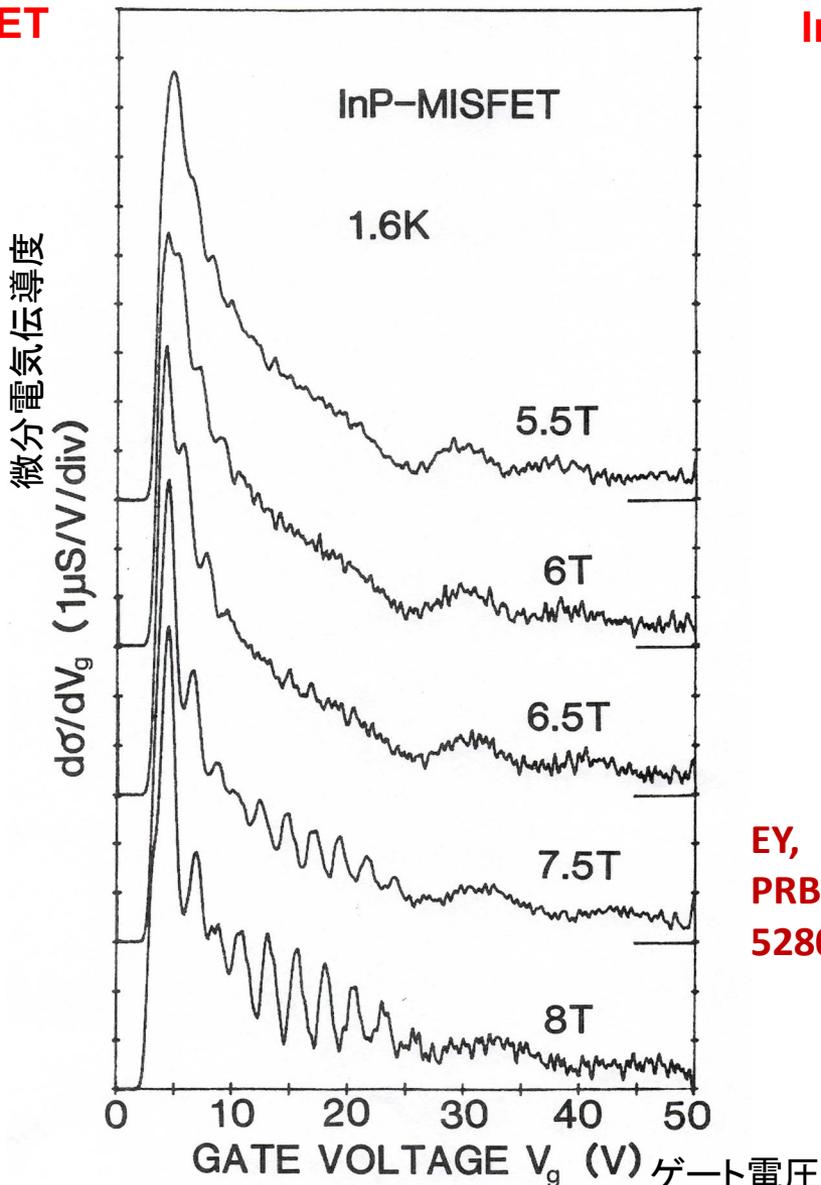
基底サブバンドの状態密度 励起サブバンドの状態密度



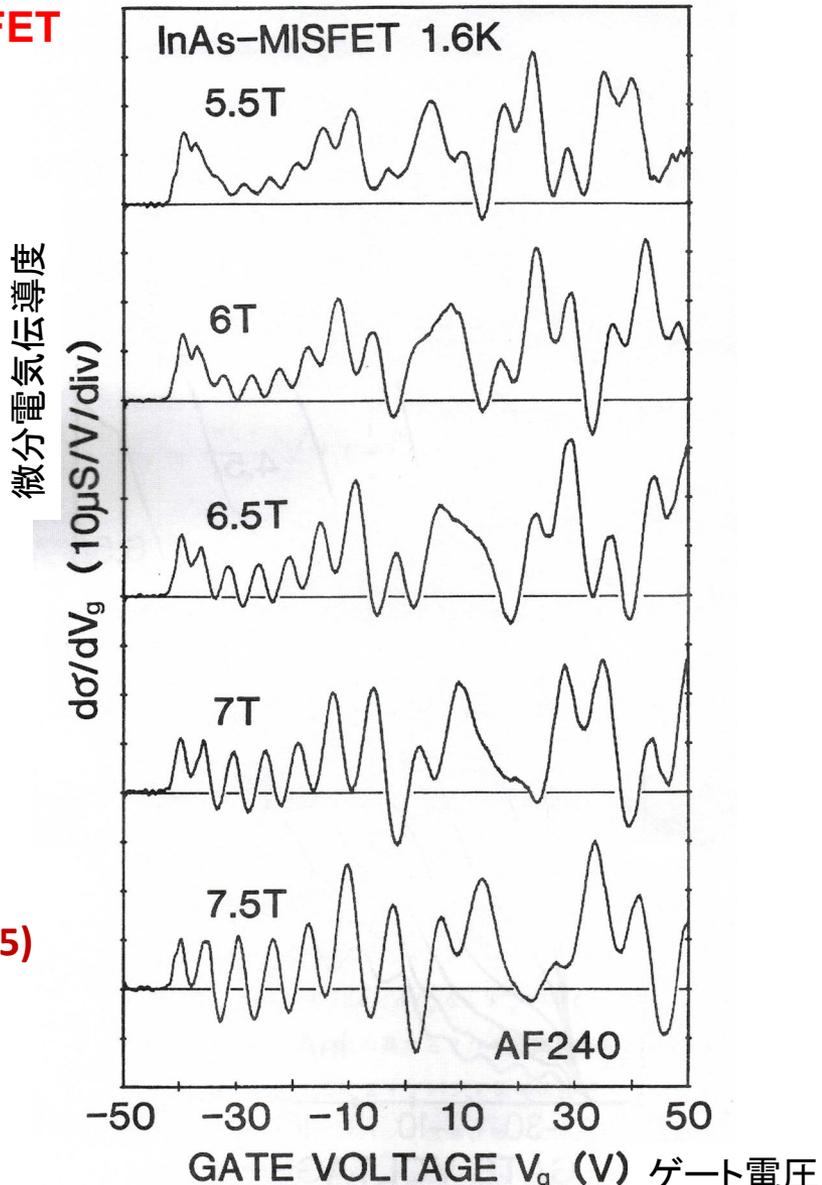
基底サブバンドの状態密度 励起サブバンドの状態密度

第2章 2次元電子系: 装置を自作, SdH効果を測定

InP-FET

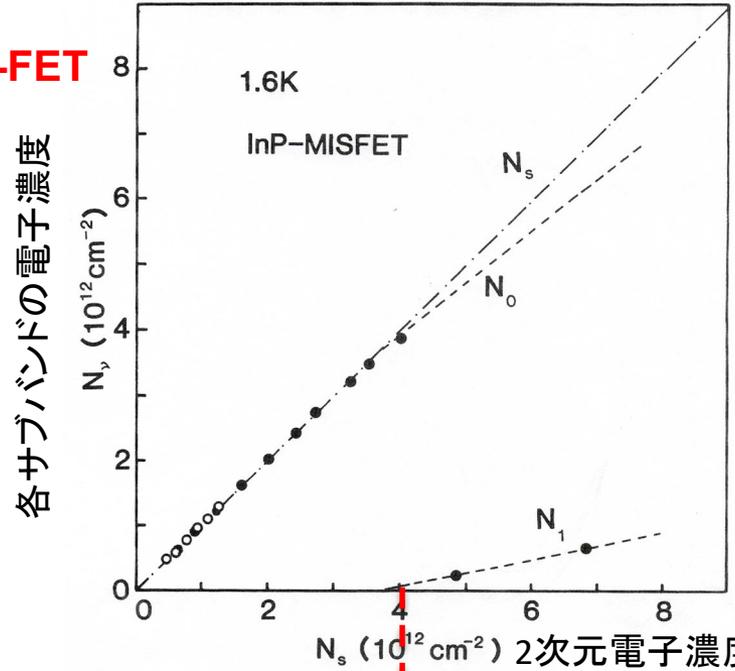


InAs-FET

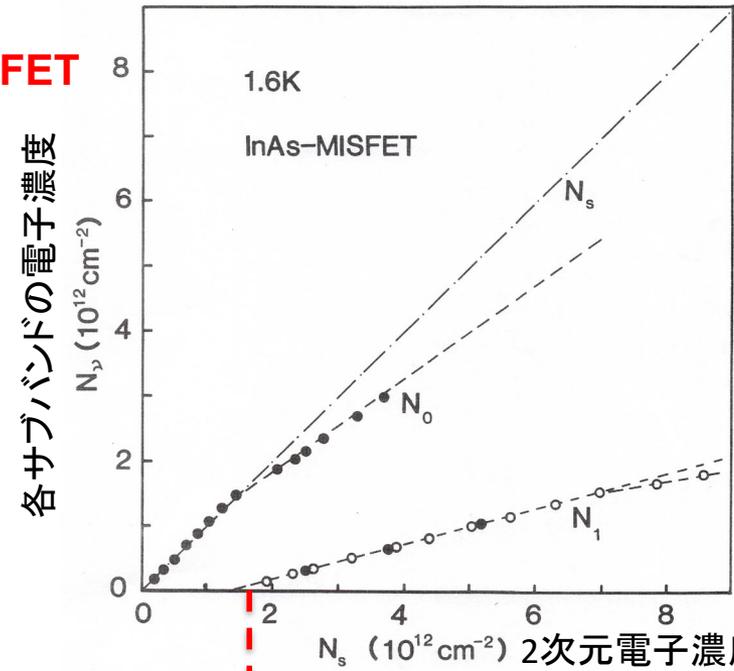


第2章 2次元電子系：モビリティ異常の正体を暴く

InP-FET

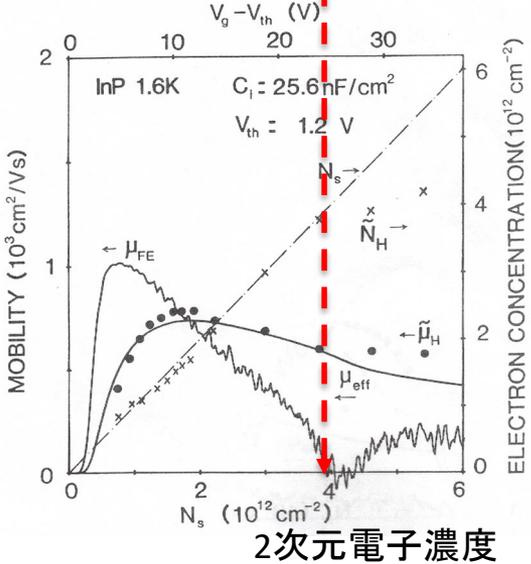


InAs-FET



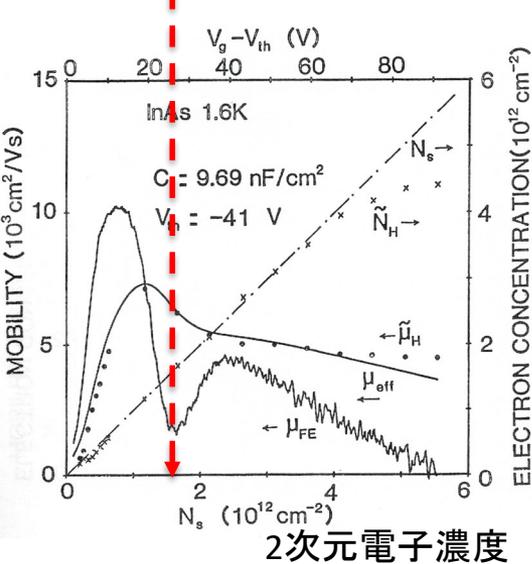
EY,
PRB 32, 8,
5280 (1985)

モビリティ

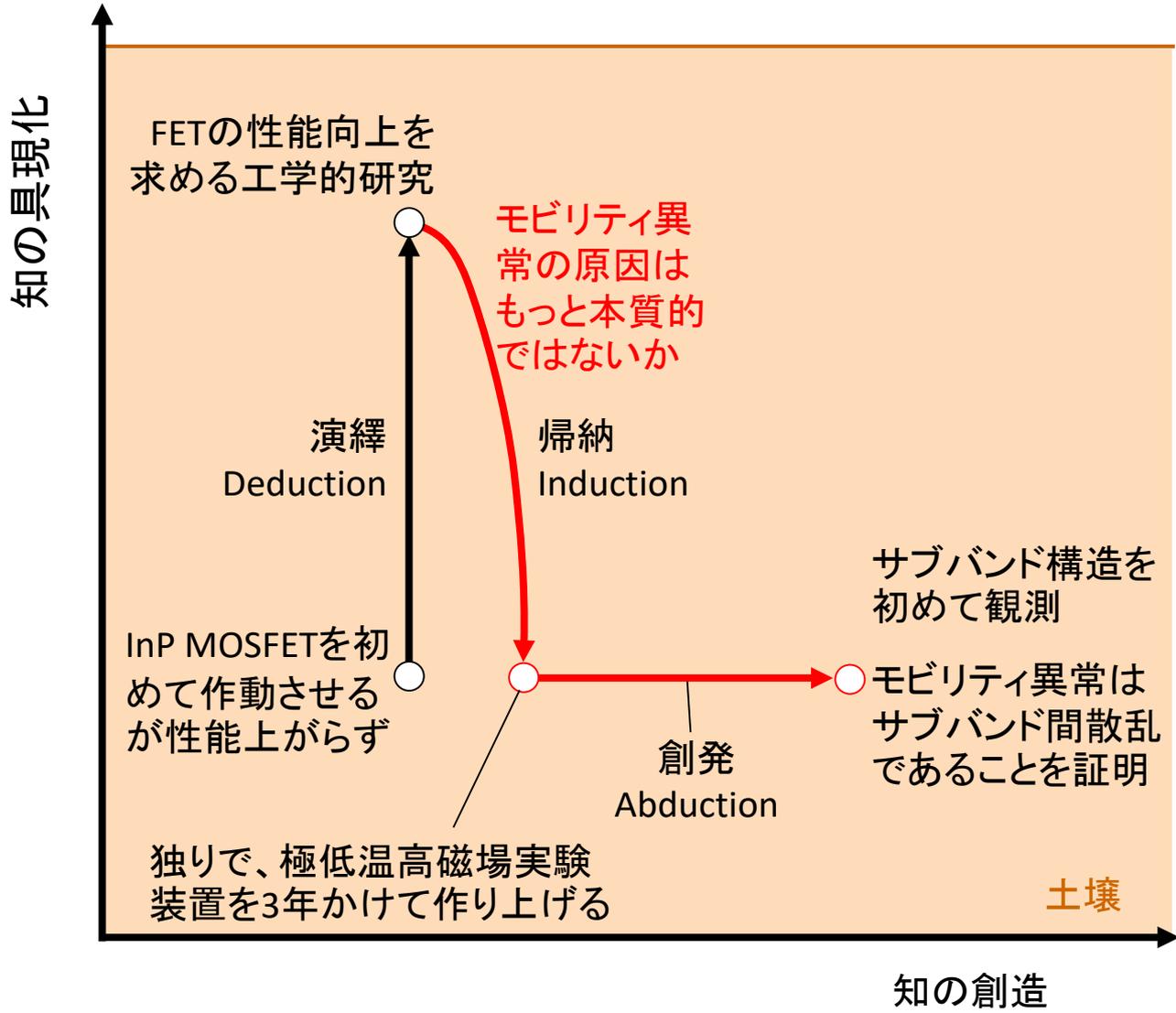


モビリティ異常の
正体はサブバンド
間の電子散乱！

モビリティ



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)

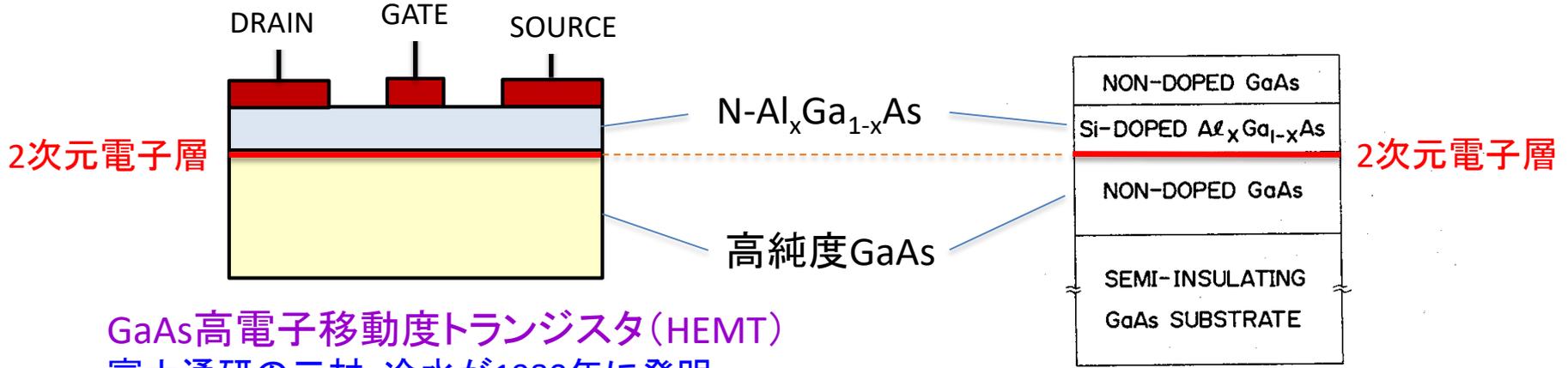
米国チームから闘いを挑まれ、それならば、と…

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)

第3章 DXセンターの理論： ことの発端

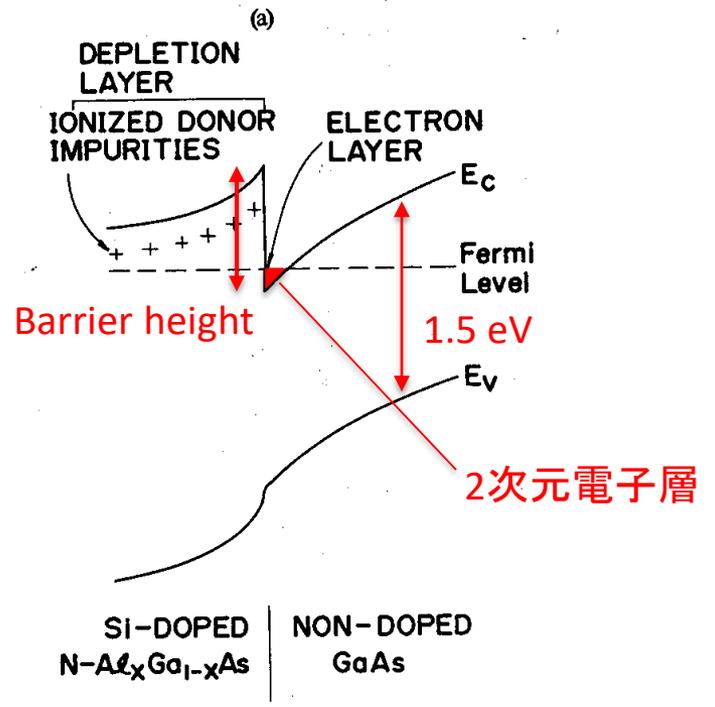


GaAs高電子移動度トランジスタ (HEMT)
 富士通研の三村・冷水が1980年に発明
 → 携帯電話などマイクロ波通信の基盤技術

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。



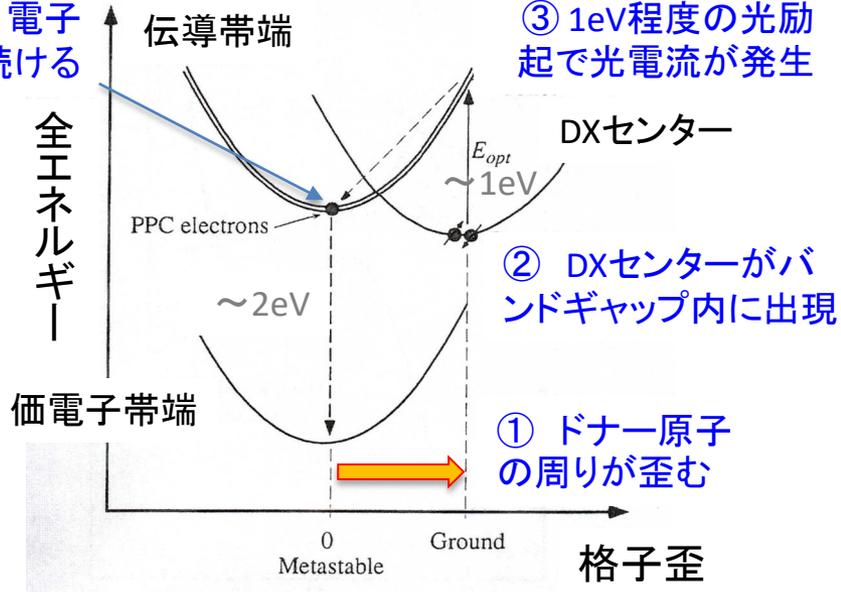
しかも、この**Deep Level**が出現すると、**永続光電流(PPC)**という不思議な現象が出現(バンドギャップより低く**Deep Level**のエネルギーよりずっと高いエネルギーの光をあてると2週間くらい光電流が流れ続ける)



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

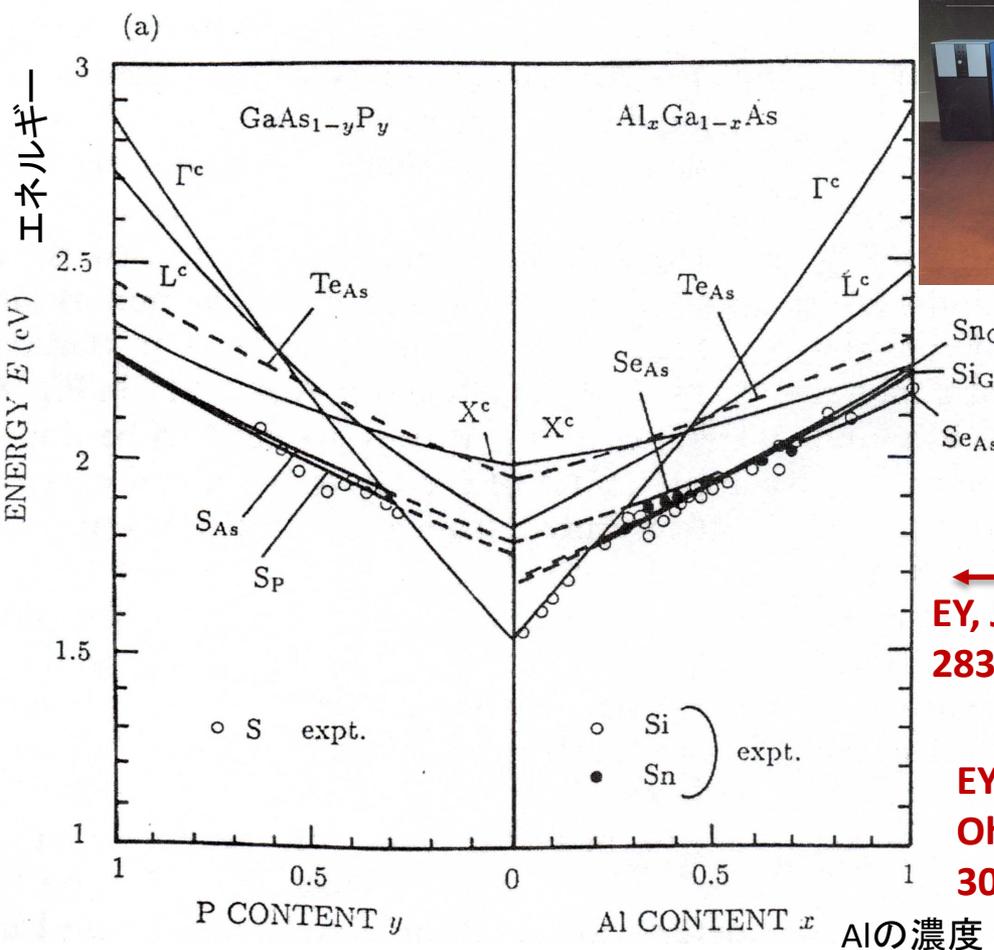
② DXセンターがバンドギャップ内に出現

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、格子歪をもたらさず、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：新しいモデルを提唱



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, 3093 (1991)

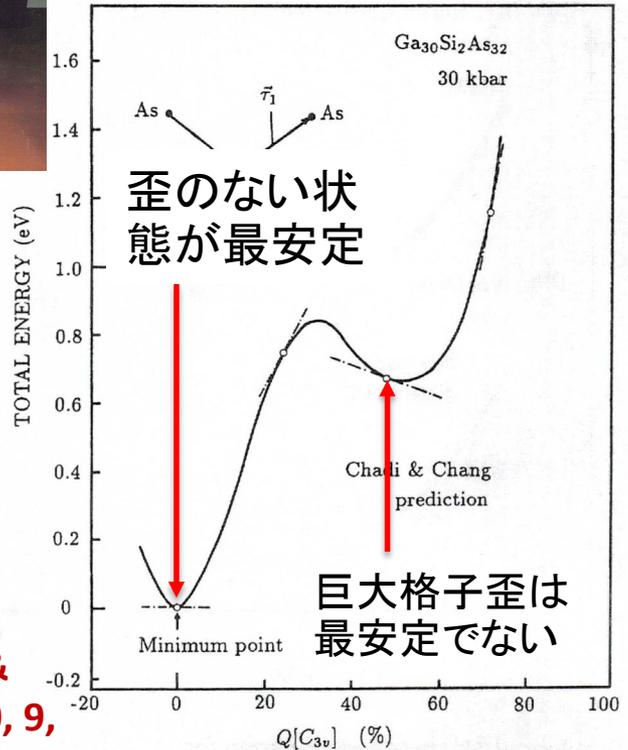
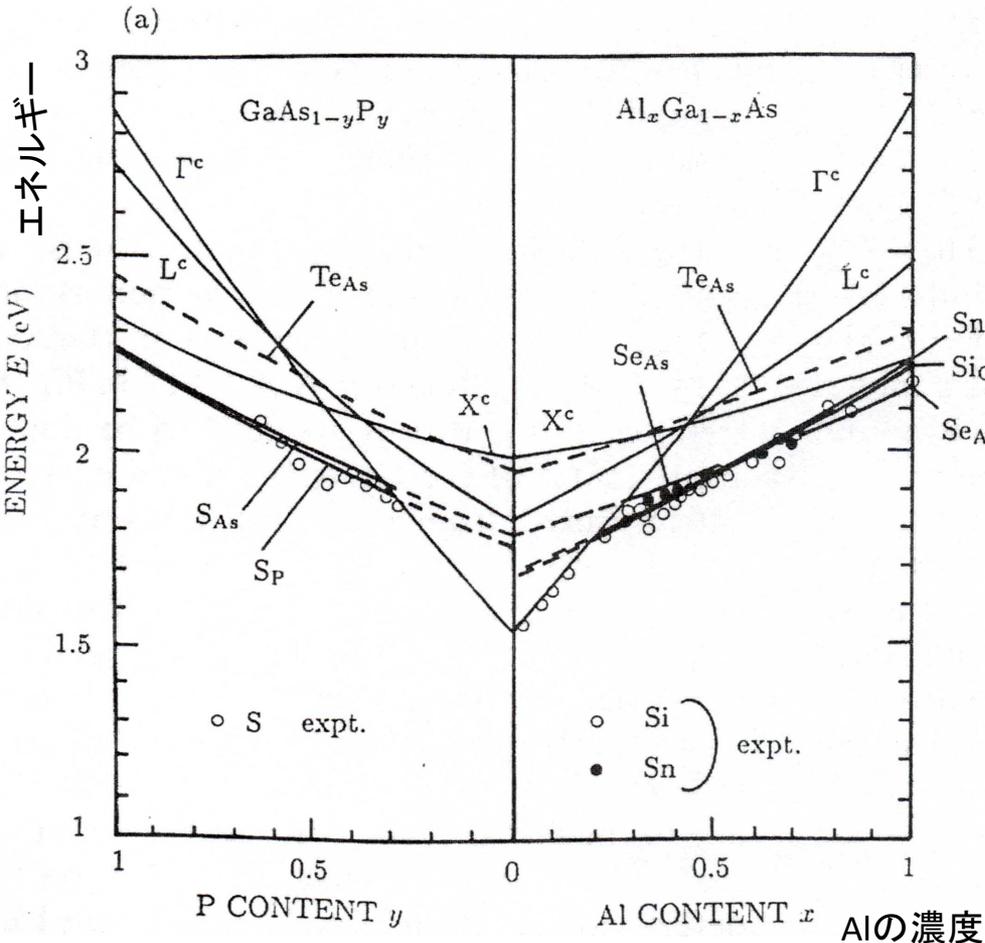


Fig. 3. Total energy of $\text{Ga}_{30}\text{Si}_2\text{As}_{32}$ (30 kbar) as a function of the movement $Q[C_{3v}]$ of one Si.

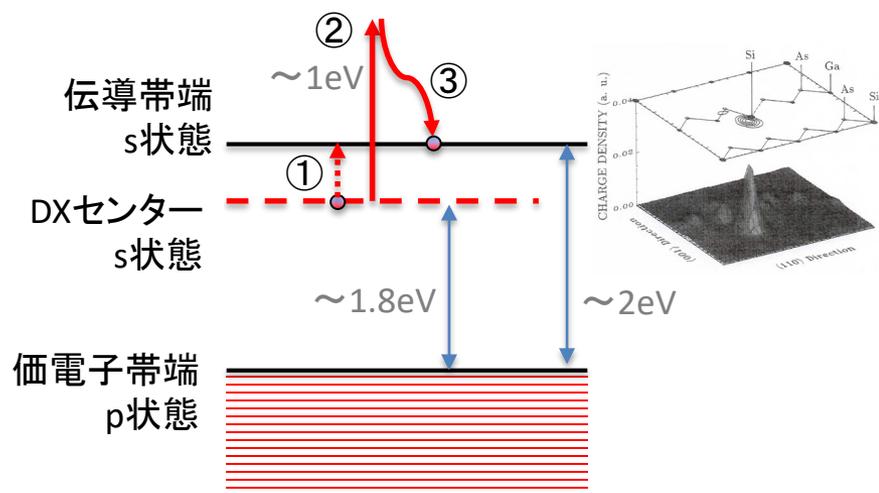
Green関数法を用いて、Si,Sn 原子が生み出す Deep Level (s状態) を理論計算した。
⇒ すると、実験をみごとに説明。

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。

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 しかるに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。

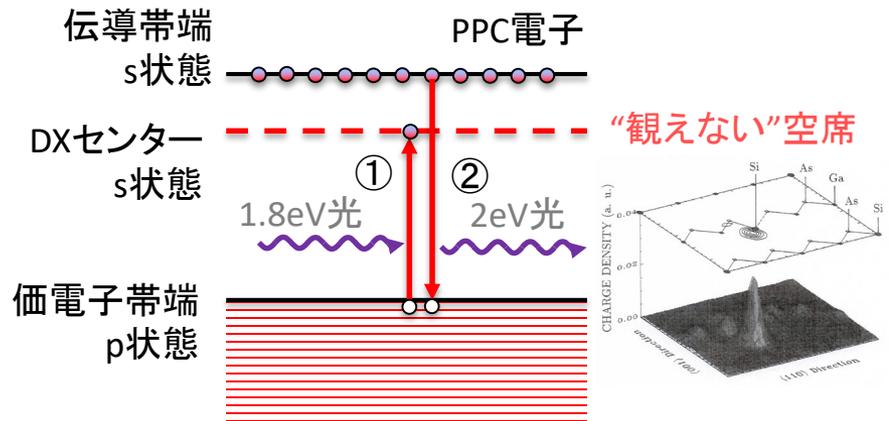
Green関数法を用いて、Si,Sn 原子が生み出す深い準位 (s状態) を理論計算した。
 ⇒ すると、実験をみごとに説明。

第4章 DXセンターの実験：米国との闘いに勝つ！

ところが...

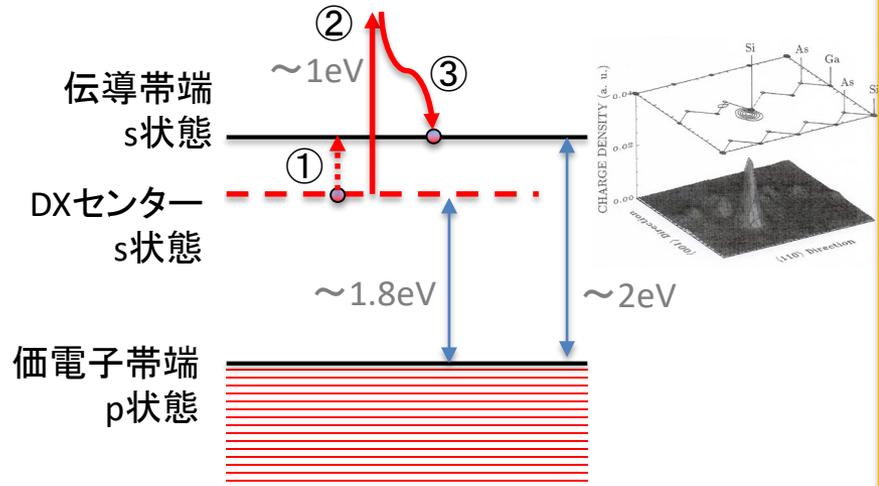
米国チームは、Lang Model に固執。
 欧州チームは、EY Model を指示。

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空孔 (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

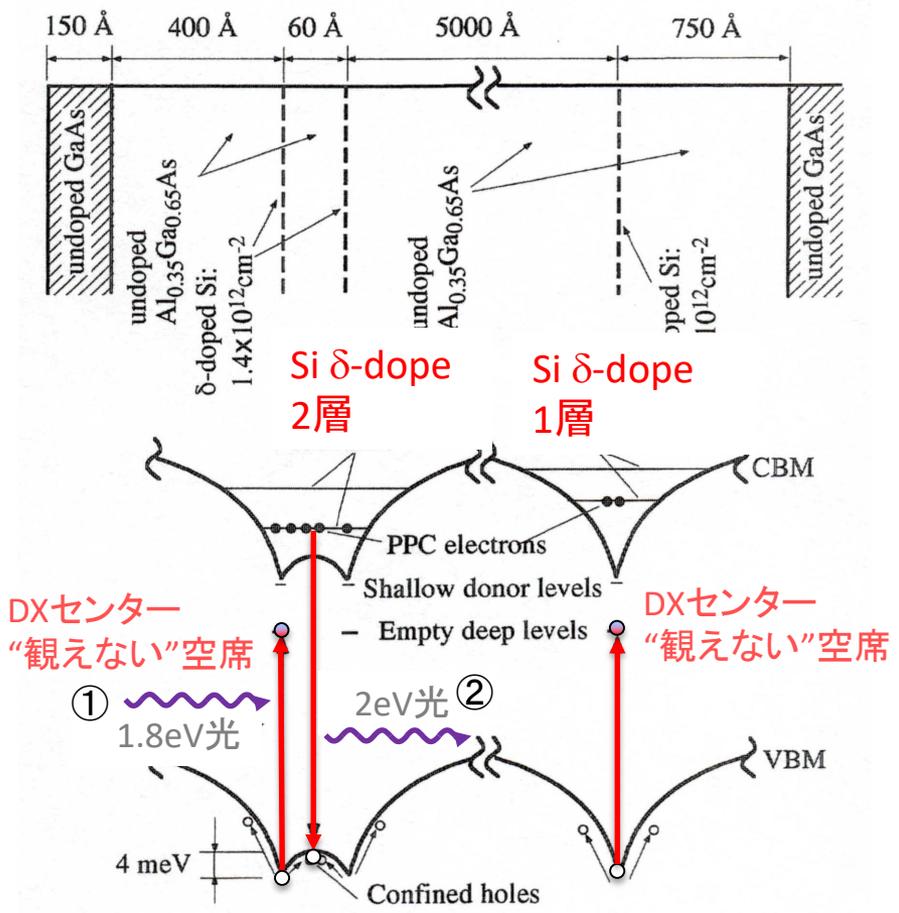
EYの微小格子歪 (SLR) モデル



- 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。

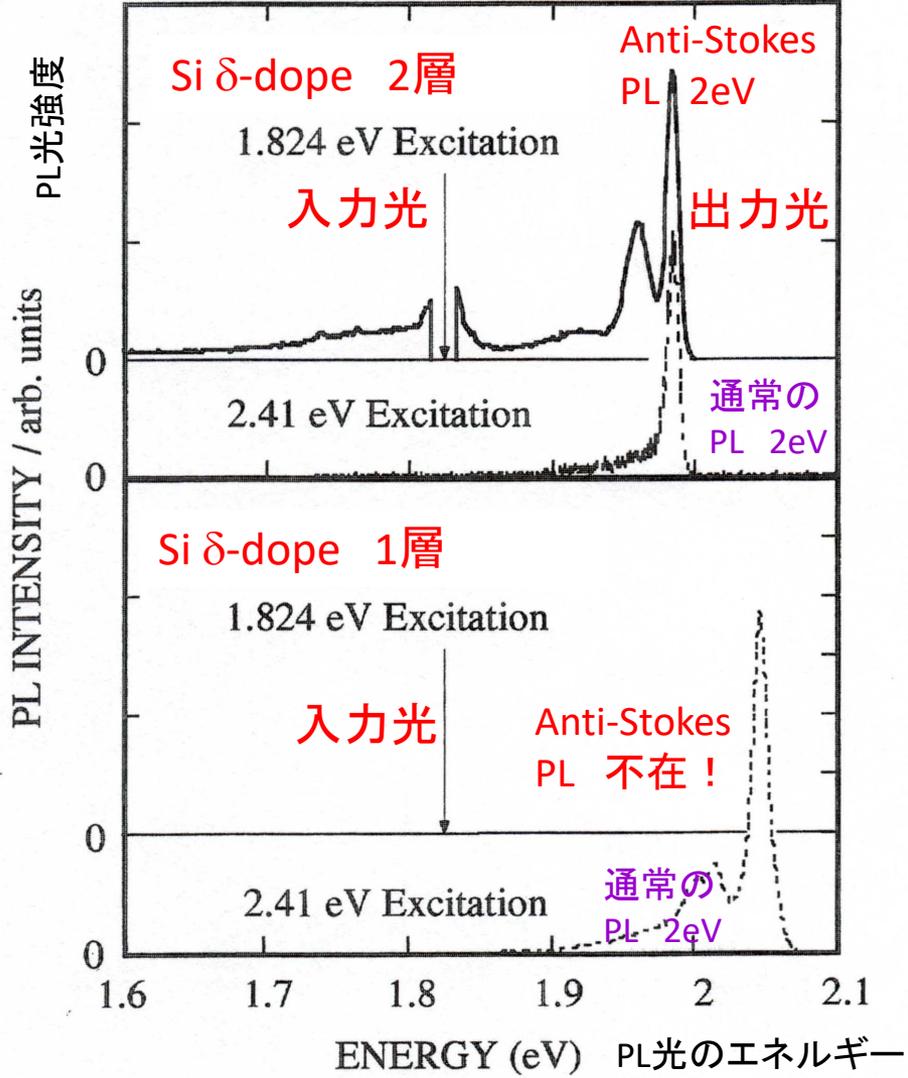
第4章 DXセンターの実験: 低エネから高エネを創る

高純度 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$

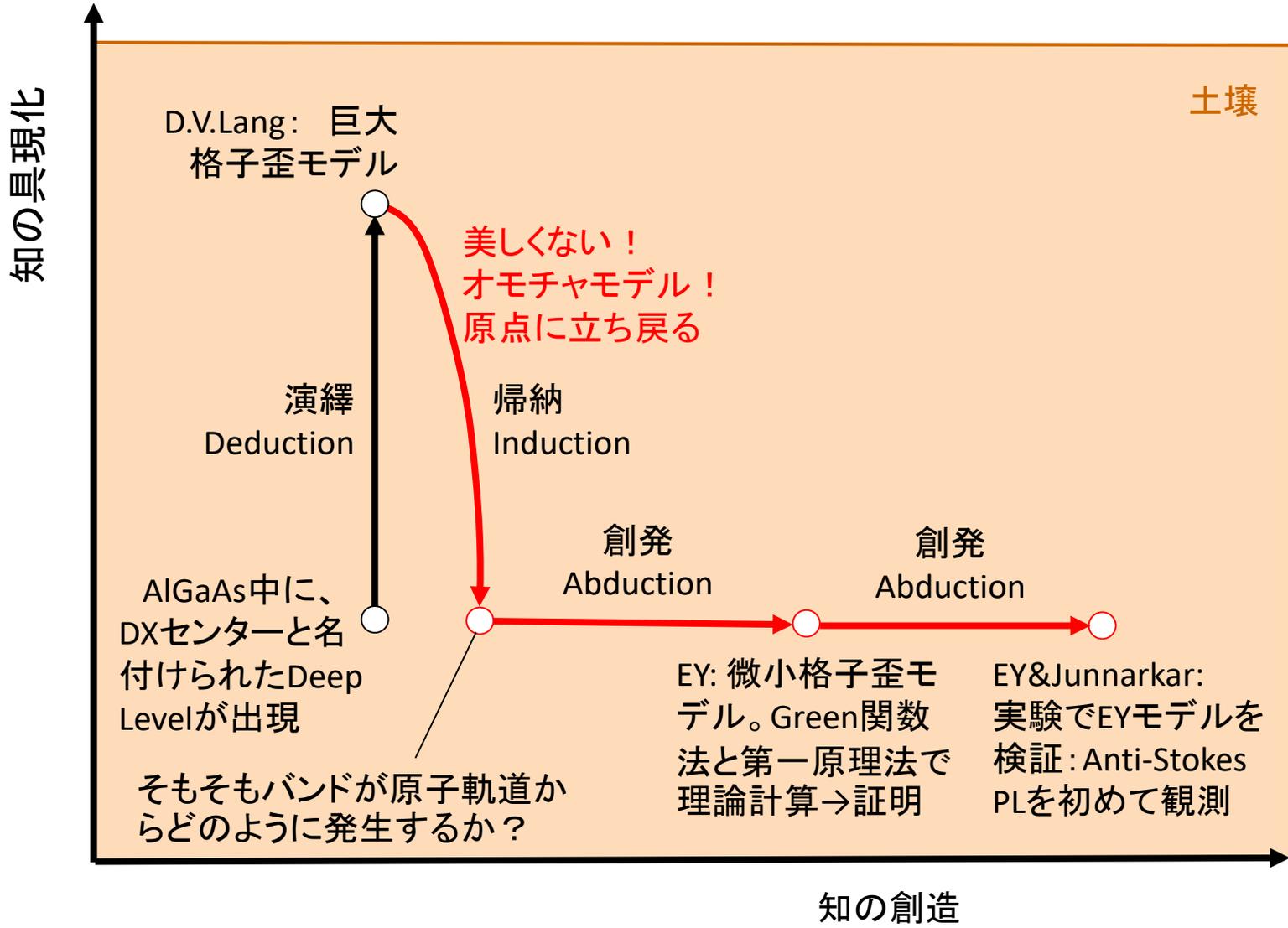


生成正孔は2つの δ -dopeの間にできた量子井戸に局在
 ⇒ ②の出力光あり

1つの δ -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)。

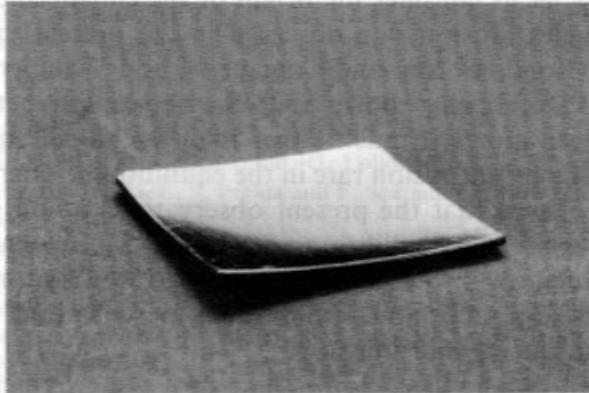
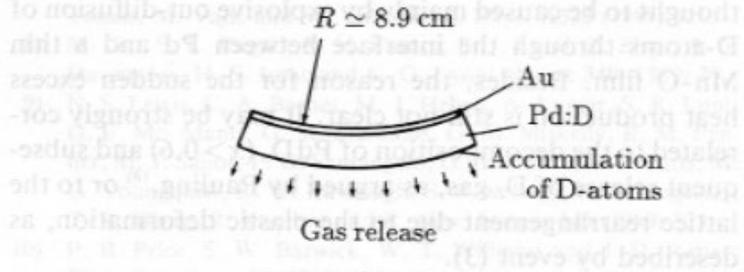


Fig. 2. A 3.0 cm x 3.0 cm palladium sample (thickness=1.0 mm) after the third neutron burst and explosive release of D₂ gas. Top side is Au-coated surface at which alloying occurred after the first neutron emission.

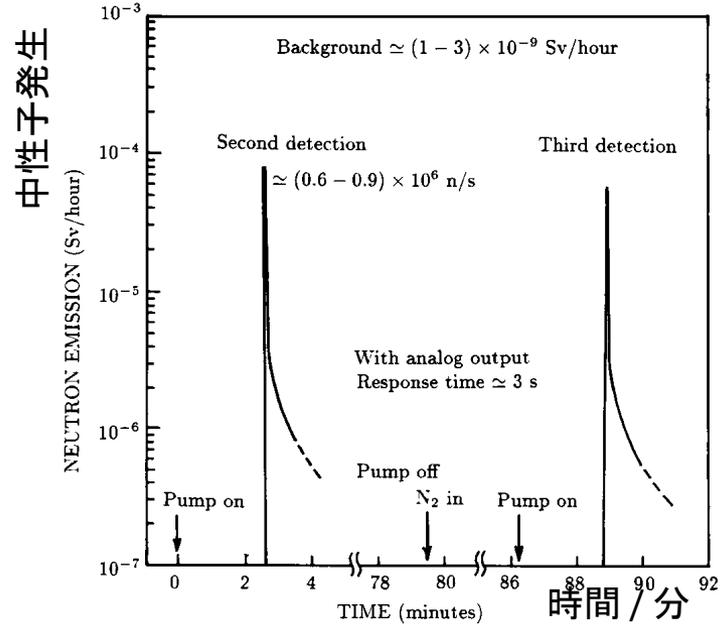
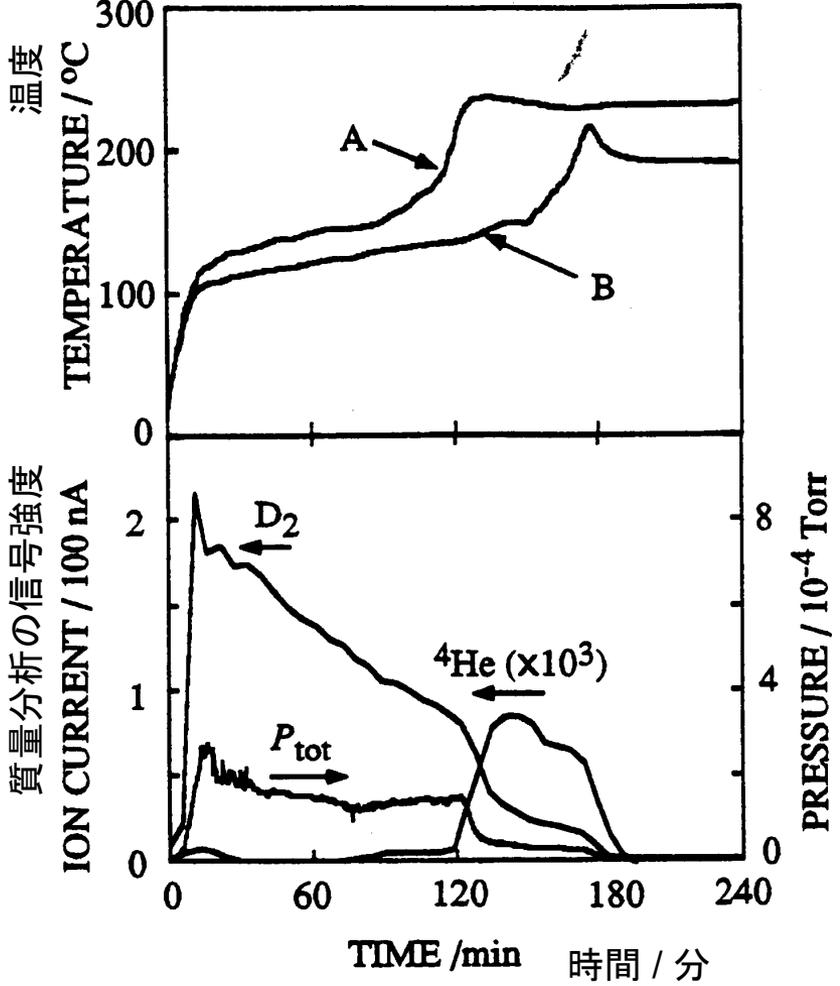
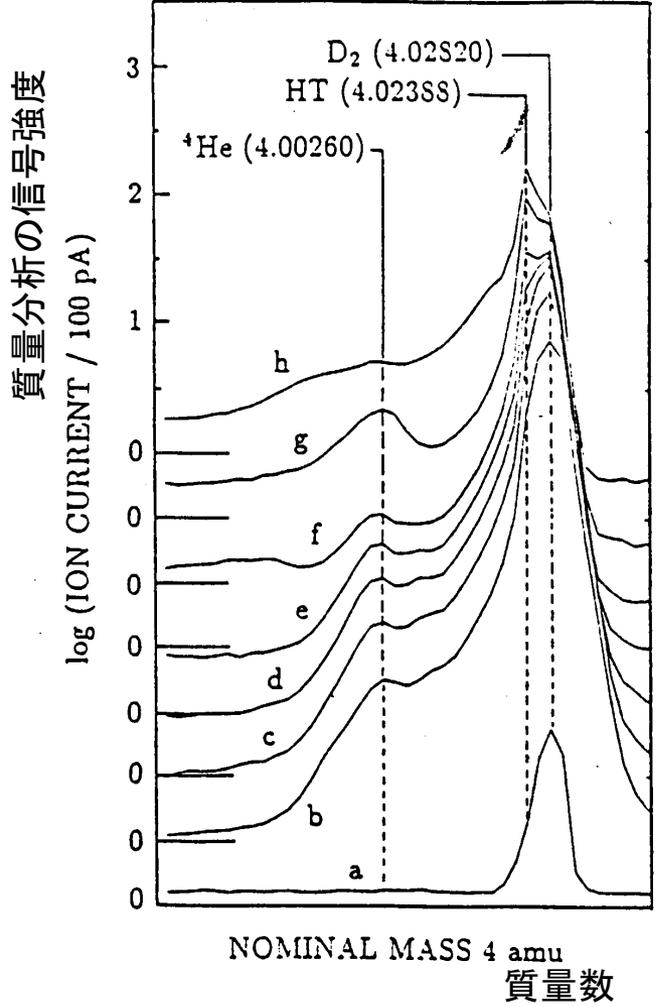


Fig. 3. The second and third neutron emissions as a function of time. The tailing behaviour after the neutron is detected is of no significance; it is only a characteristic of the analog output of the device.

第5章 常温核融合: Heと過剰熱の同期発生を観測

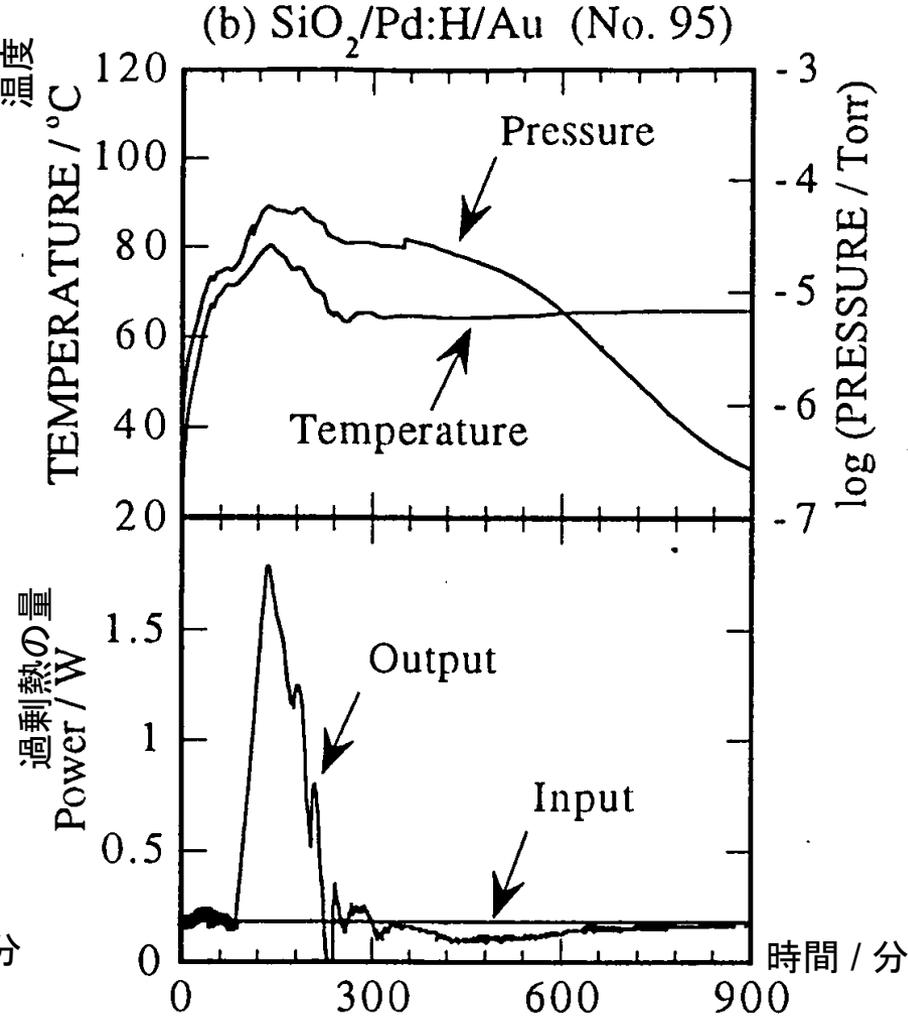
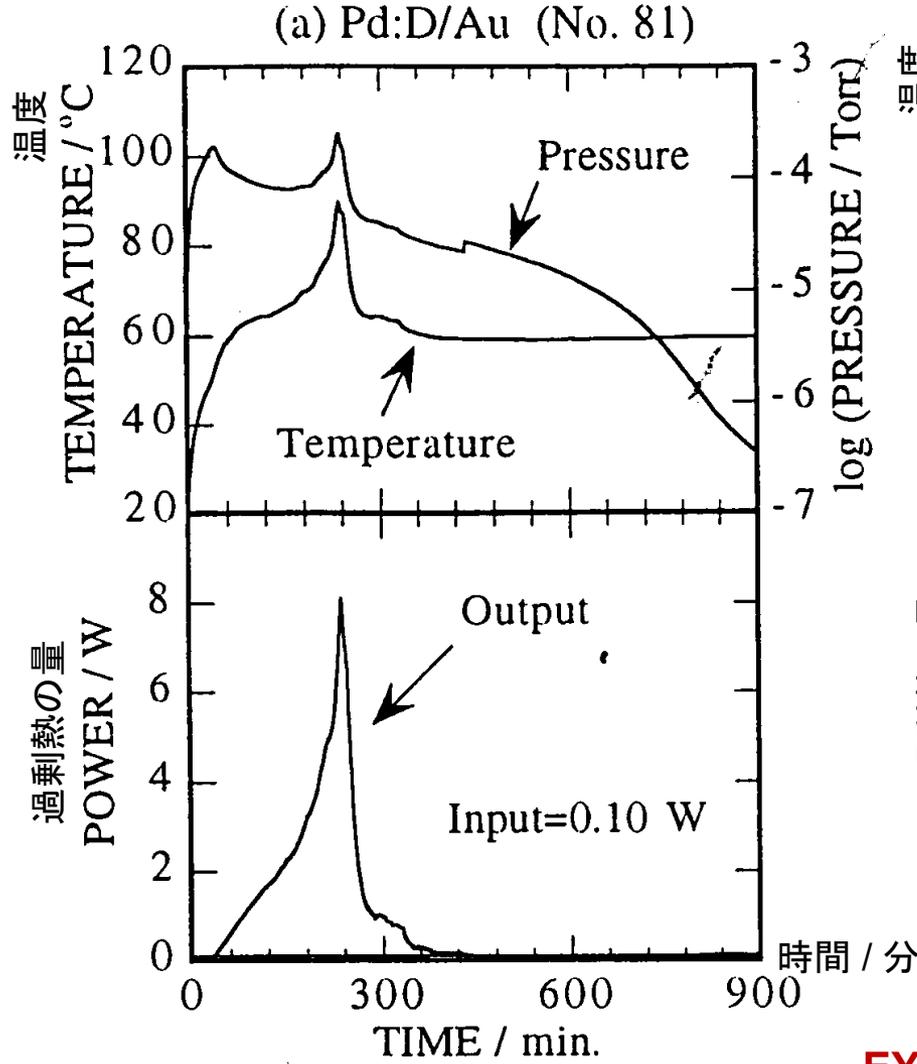
真空法でHe-4の生成を、
real timeで初めて観測

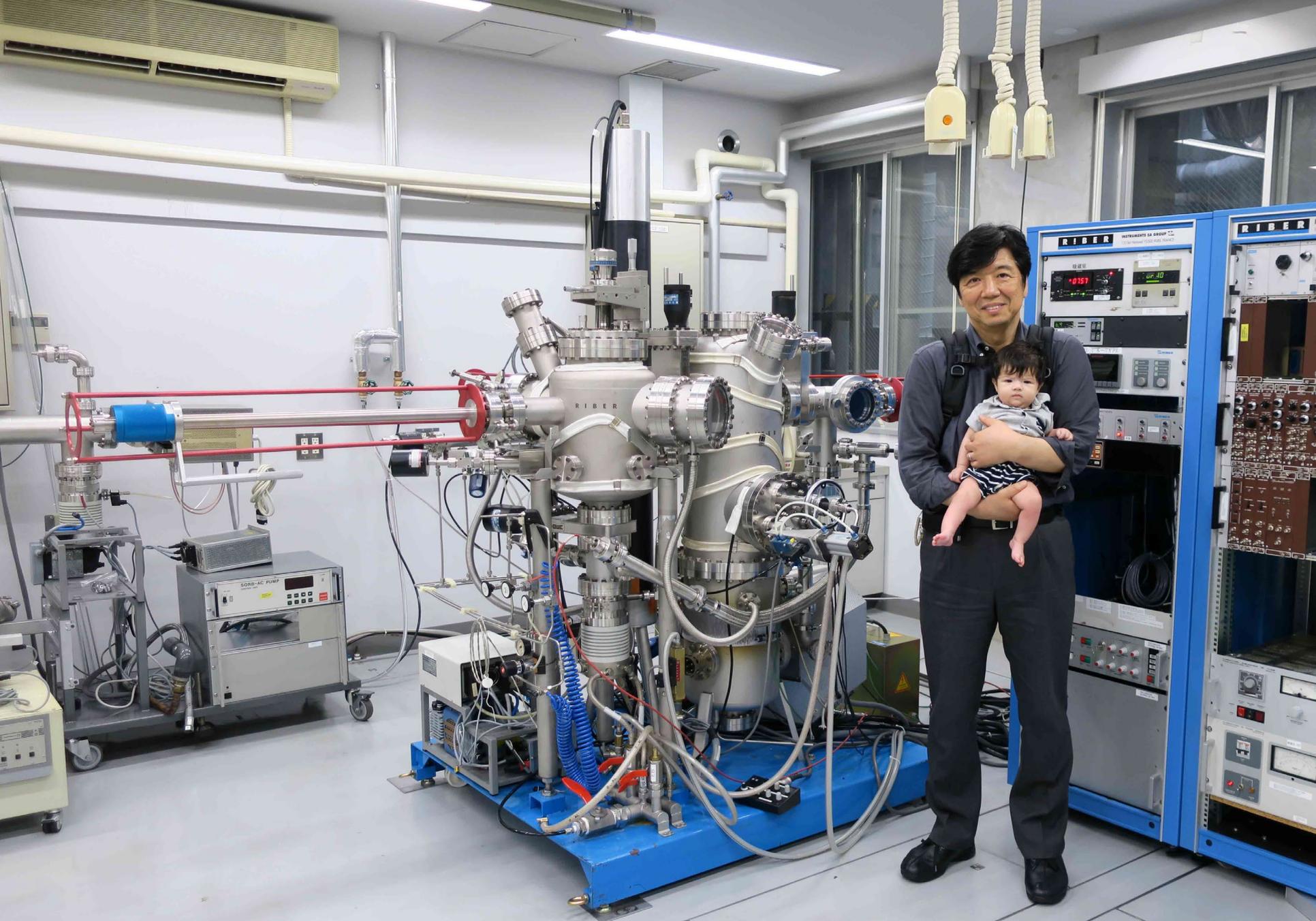
真空法による過剰熱発生と
He-4の生成



第5章 常温核融合：南仏にて、過剰熱条件を発見

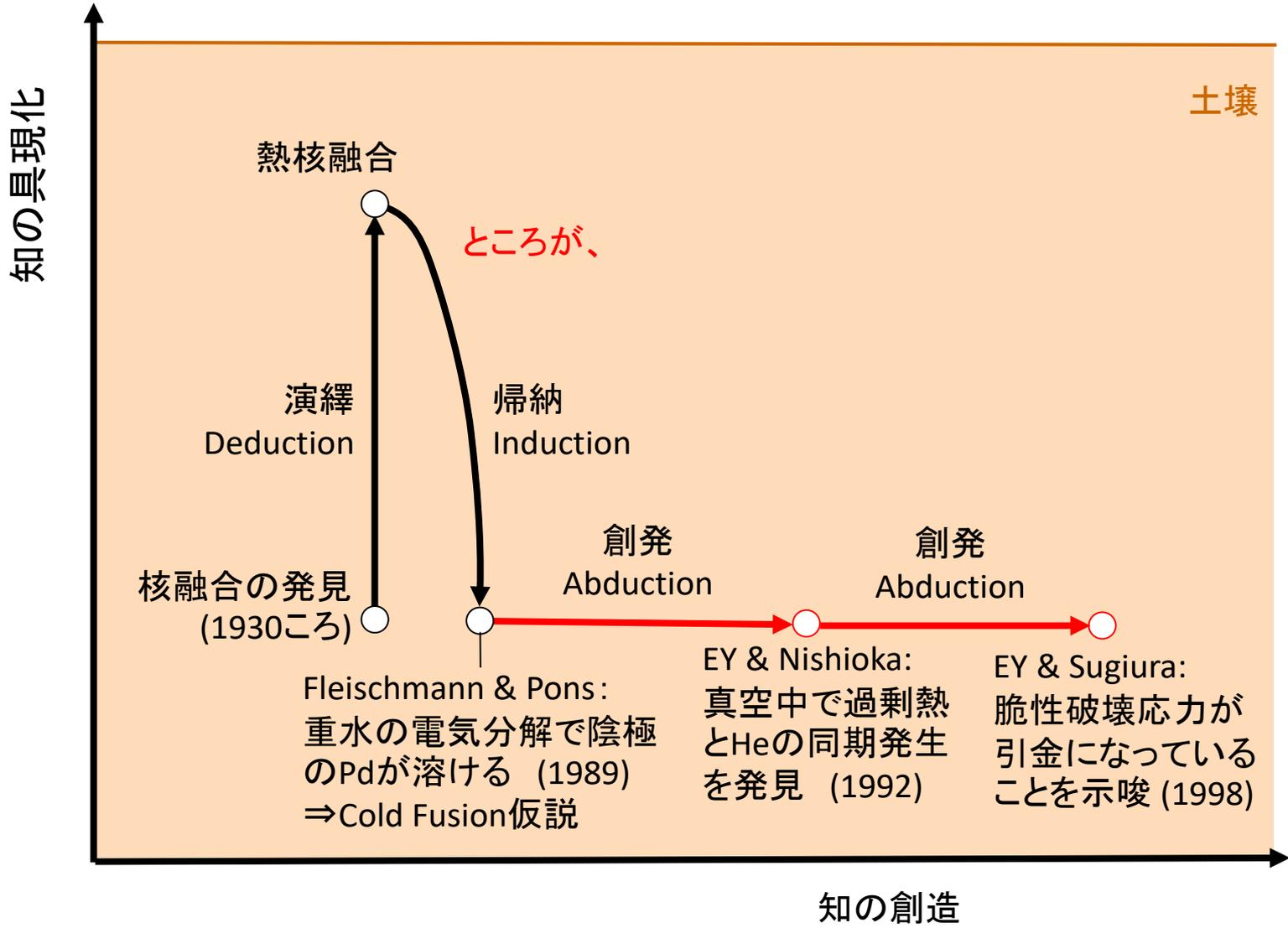
—Pd板の塑性変形を妨げることにより、過剰熱が増大することを発見。





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（2020～ ）