

- 1) 電子の粒子性と波動性
- 2) 波としての電子と半導体
- 3) ナノの世界を見る
- 4) 医療と現代物理
- 5) 電気の流れるプラスチック
- 6) 超伝導・超流動を見る

現代物理学の考え方

その5

電気の流れるプラスチック

溝口憲治

有機物質の応用

生体物質

プラスチック

軽い・しなやか

耐久性
の制御

有機物質の応用

生体物質

DNA, BioSensor

有機結晶

有機EL表示
面発光照明

有機薄膜FET
トランジスタ

プ

2010年
ノーベル物理学賞
グラフェン

Andre Geim and Konstantin Novoselov

2000年
ノーベル化学賞
導電性高分子

有機2次電池

有機太陽電池

有機物質の基礎物性

生体物質

プ

2010年
ノーベル物理学賞
グラフェン

Andre Geim and Konstantin Novoselov

有機結晶

構造設計性
の高さ

2000年
ノーベル化学賞
導電性高分子

有機物質の基礎物性

生体物質

DNAの基礎物性

電荷密度波
スピン密度波
スピンパイエルス

有機結晶

p波超伝導?
電界誘起超伝導

ソリトン・
ポーラロン

プ

2010年
ノーベル物理学賞
グラフェン

Andre Geim and Konstantin Novoselov

2000年
ノーベル化学賞
導電性高分子

1次元、2次元
電子構造





2000年ノーベル化学賞受賞

「伝導性ポリマーの発見と開発」

白川英樹（筑波大名誉教授）

Alan J. Heeger (UCSB)

Alan G. MacDiarmid (PU)

10月11日 白川英樹 筑波大学名誉教授 ノーベル化学賞受賞

「伝導性ポリマーの発見と開発」の業績

Dr. Heeger (Prof. of **physics** at the University of California, Santa Barbara), Dr. MacDiarmid (Prof. of **chemistry** at the University of Pennsylvania)



Alan G. MacDiarmid

Hideki Shirakawa

Alan J. Heeger

Professor at the University of Pennsylvania,
Philadelphia, USA.

Professor Emeritus,
University of Tsukuba, Japan.

Professor at the University of California,
at Santa Barbara, USA.



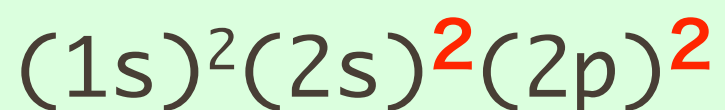
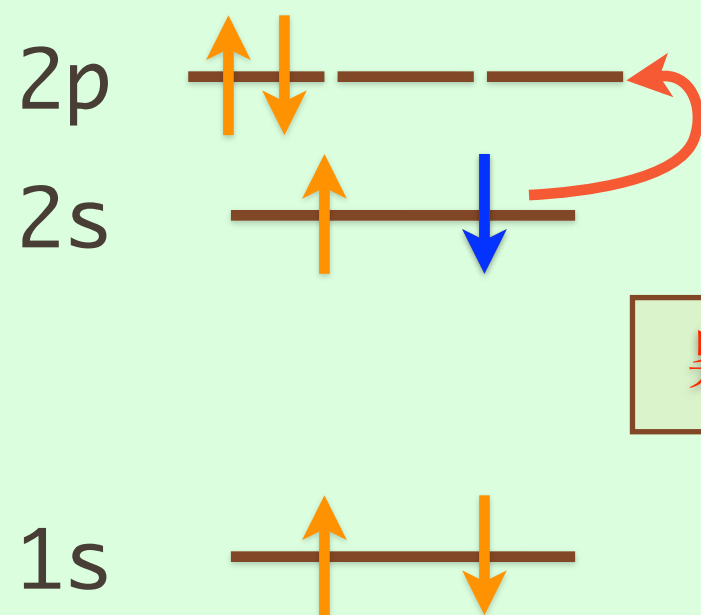


有機物質とは？

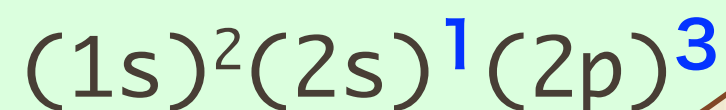
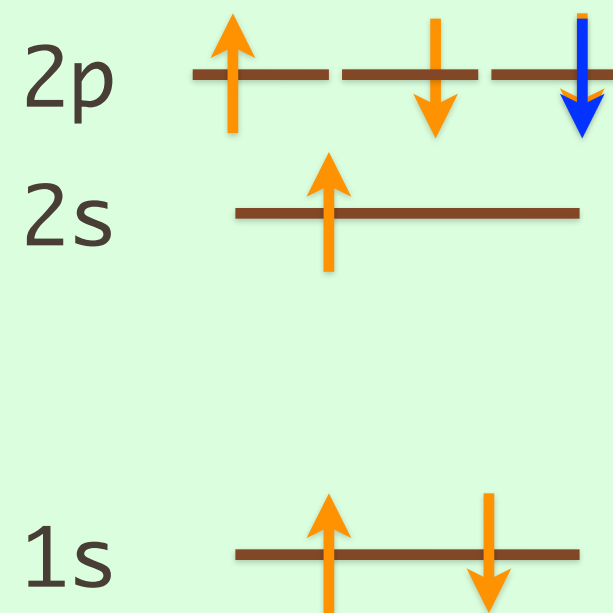
炭素の世界

高い結合の自由度

原子 ^{12}C



結合した ^{12}C

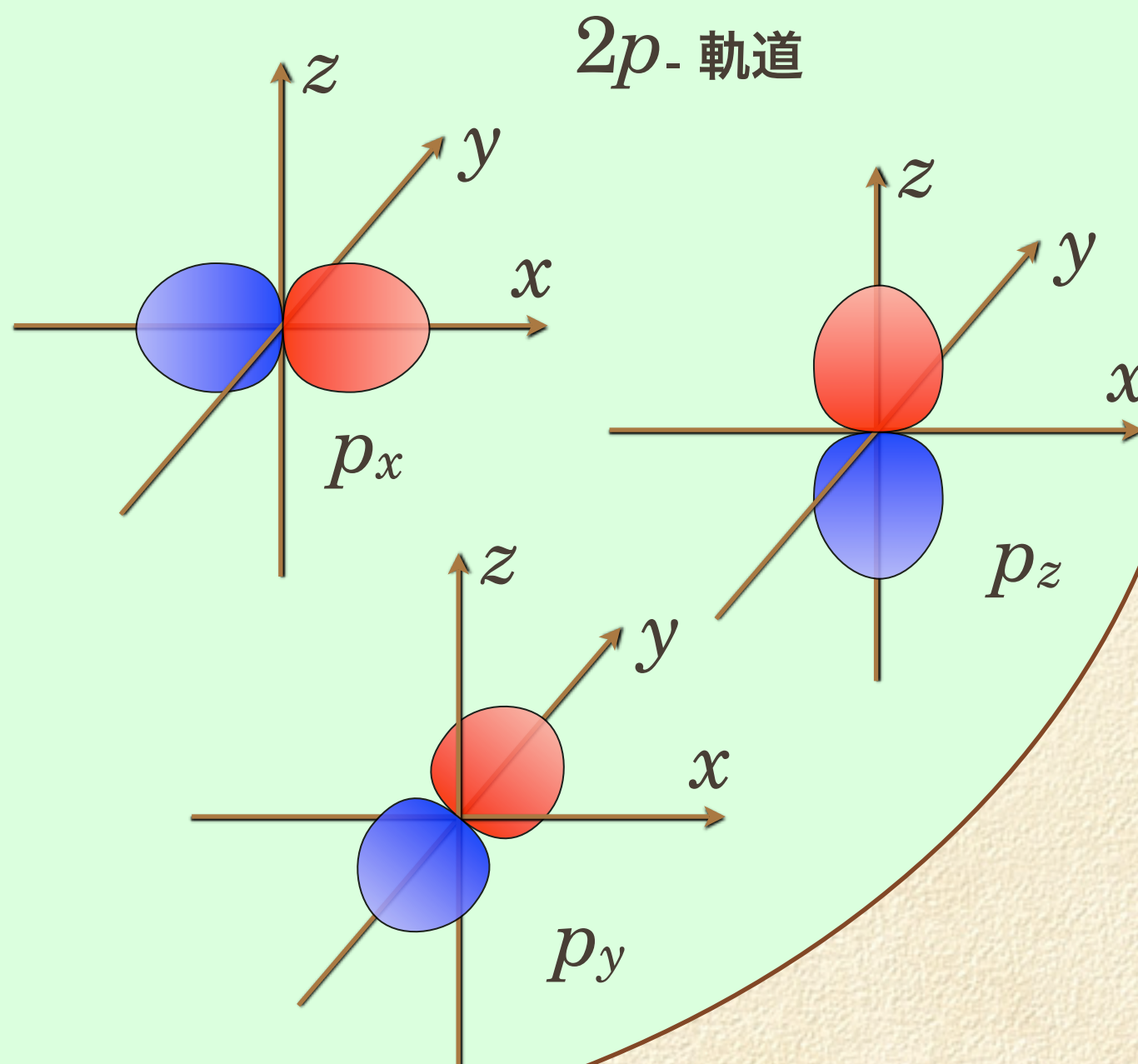
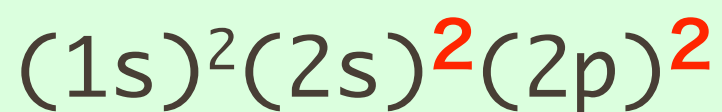
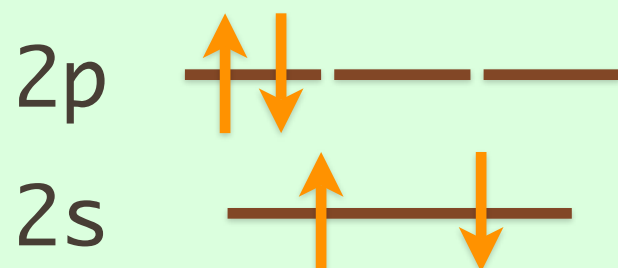


有機物質とは？

炭素の世界

高い結合の自由度

昇進前：原子 ^{12}C

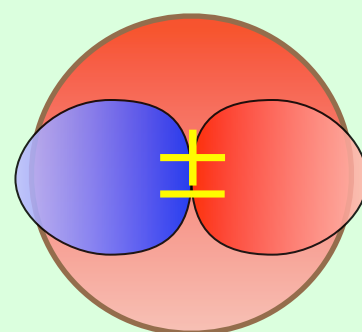


有機物質とは？

炭素の世界

有機構造を形作る
混成 σ 軌道

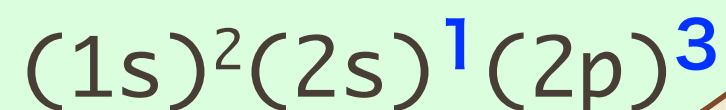
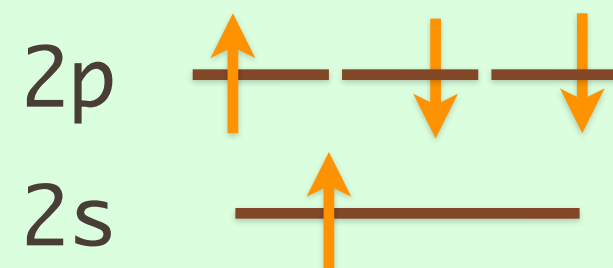
sp



sp^2

sp^3

昇進後：結合 ^{12}C

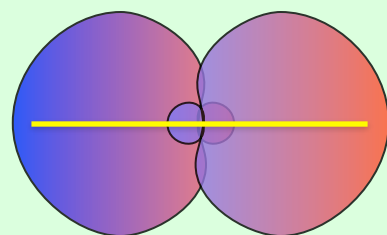


有機物質とは？

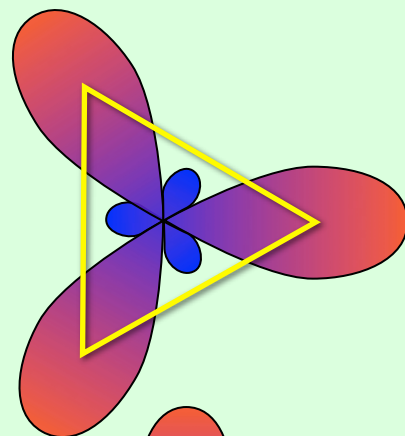
炭素の世界

有機構造を形作る
混成 σ 軌道

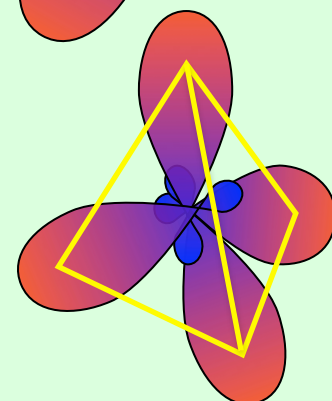
sp



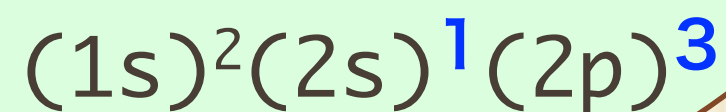
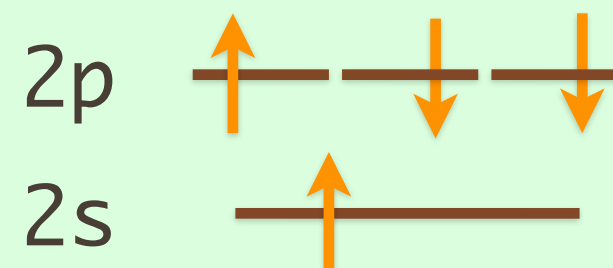
sp^2



sp^3



昇進後：結合 ^{12}C

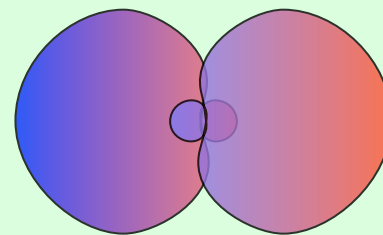
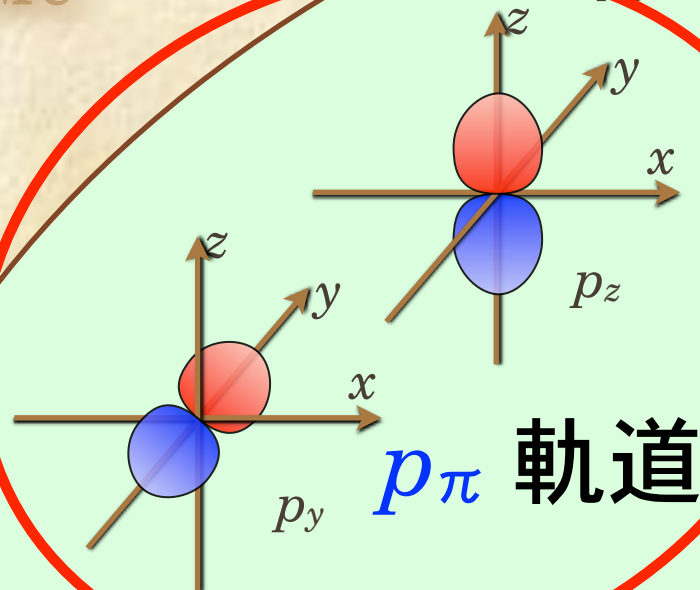


有機物質とは？

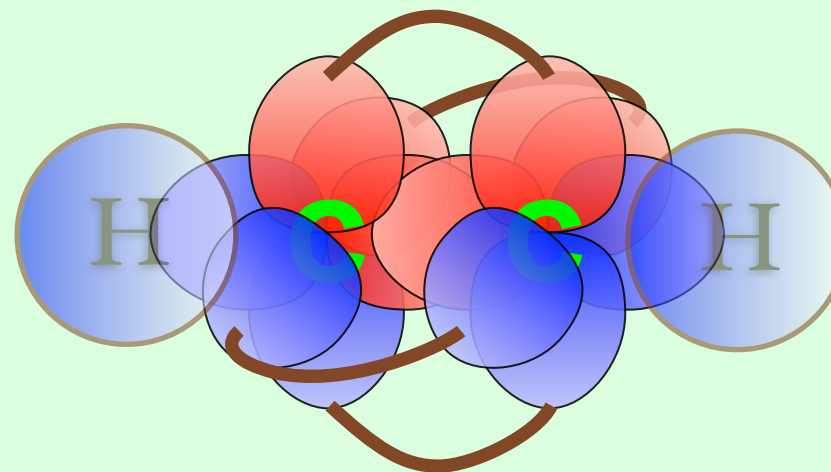
炭素の世界

有機構造の骨格を作る

sp -混成 σ 軌道



例：アセチレンガス
 C_2H_2



$\sigma + \pi_z + \pi_x$

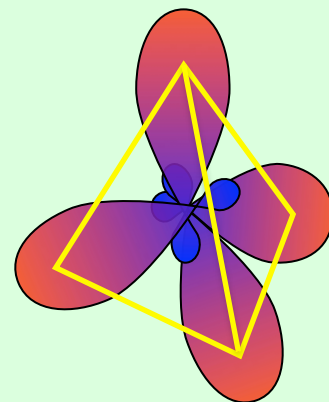
の3重結合

有機物質とは？

炭素の世界

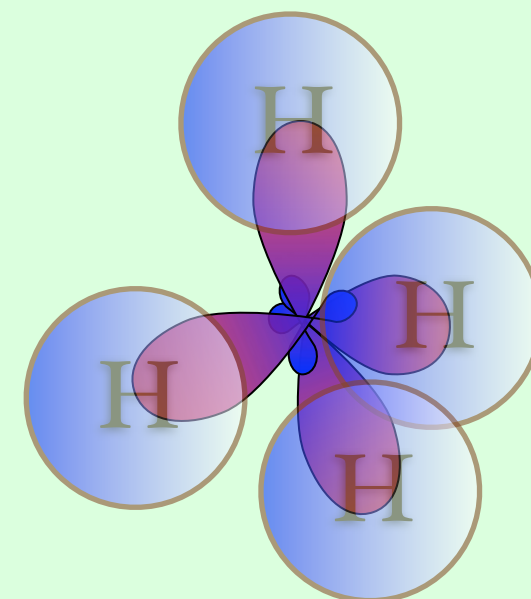
有機構造を形作る

sp^3 -混成軌道



例: **メタン**

ダイヤモンド
シリコン
ゲルマニウム
GaAs
等々

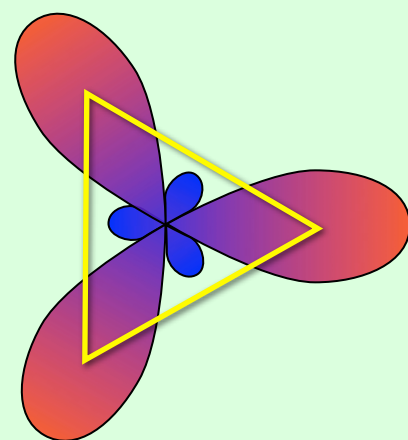


有機物質とは？

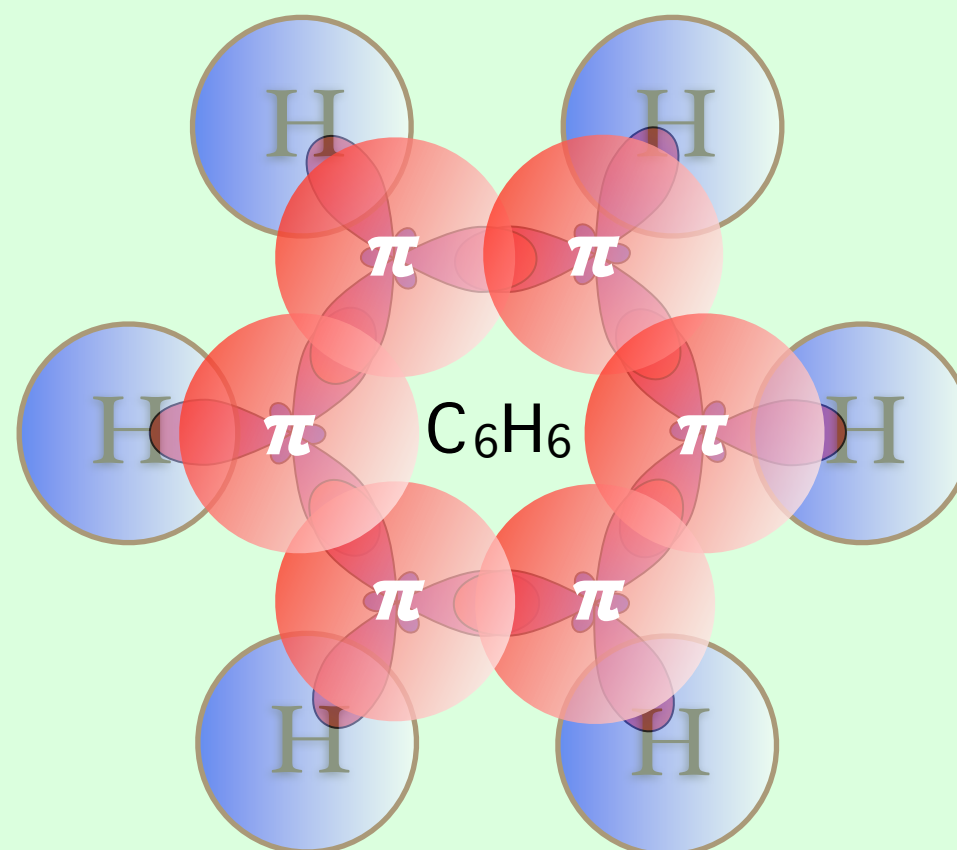
炭素の世界

有機構造を形作る

sp^2 -混成軌道



2重結合の供給源

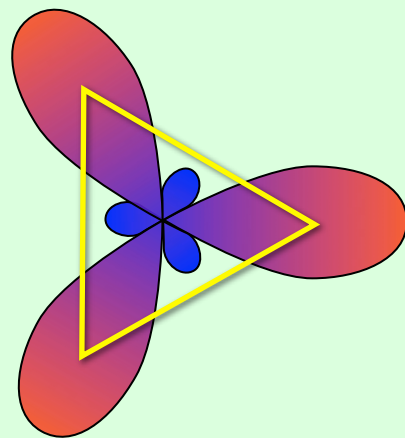


有機物質とは？

炭素の世界

有機構造を形作る

sp^2 -混成軌道



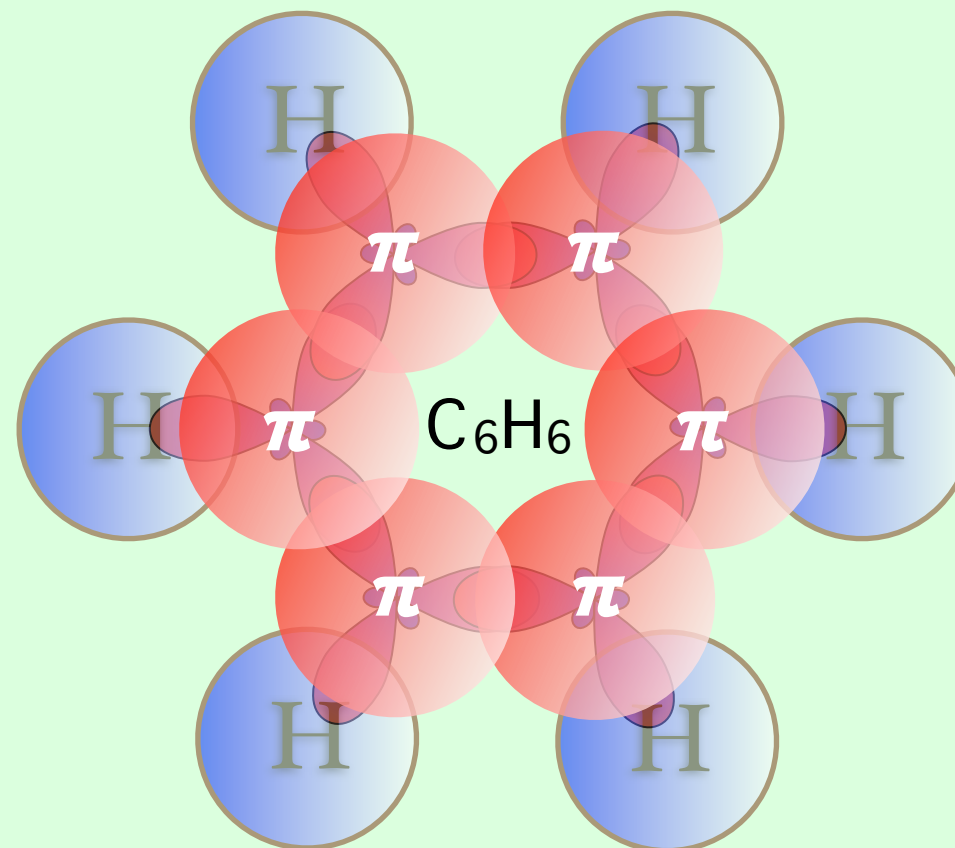
これを**2次元平面**で繋ぐと

=> **graphene**

透明電極

FET

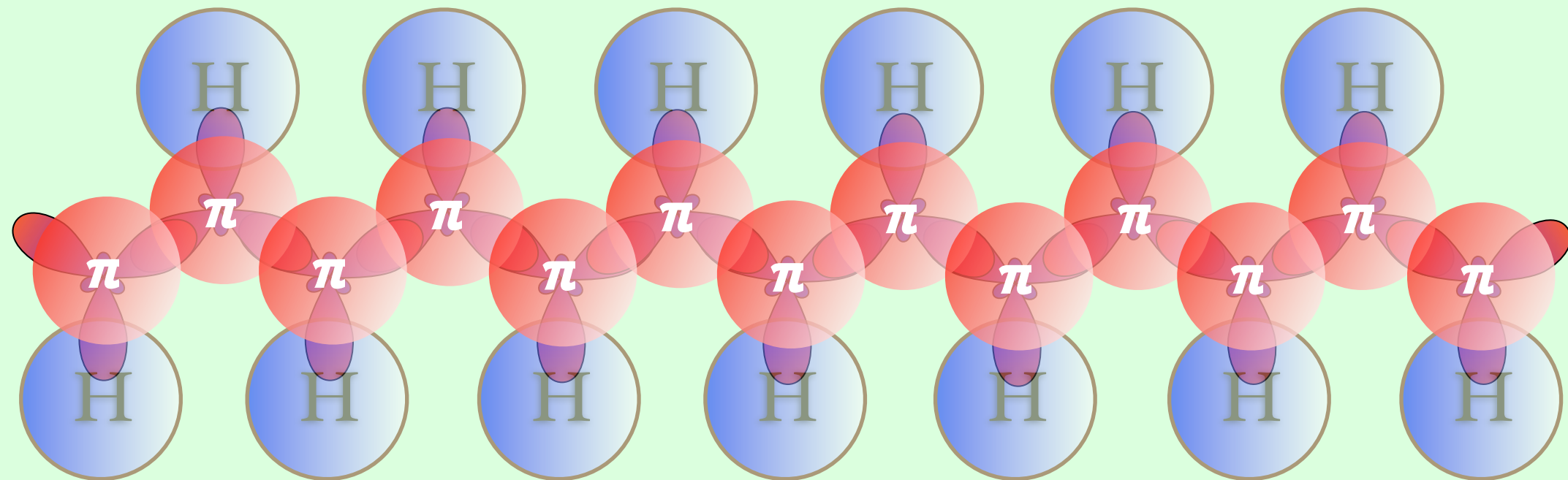
太陽電池



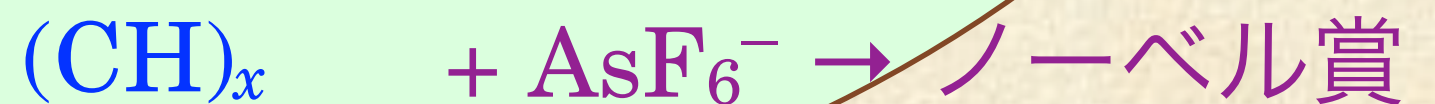
ポリアセチレン とは？

導電性高分子

p_{π} -電子の活躍
→ 電気伝導性

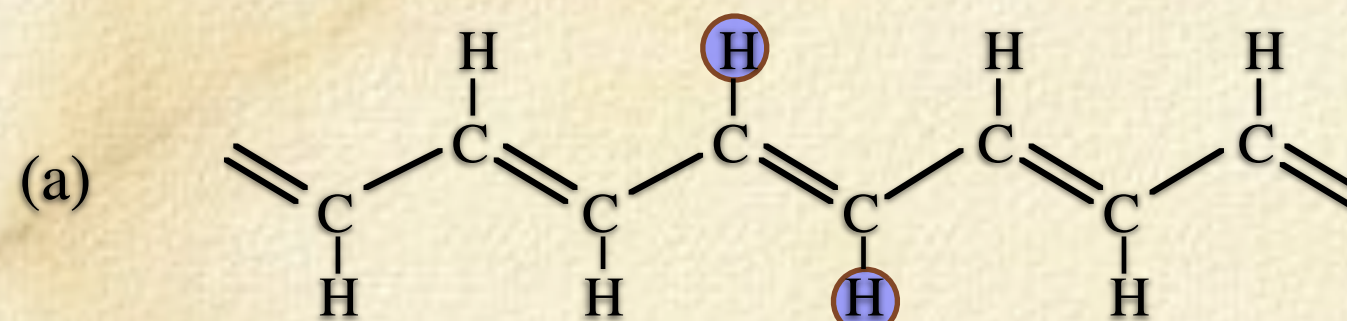


ポリアセチレン

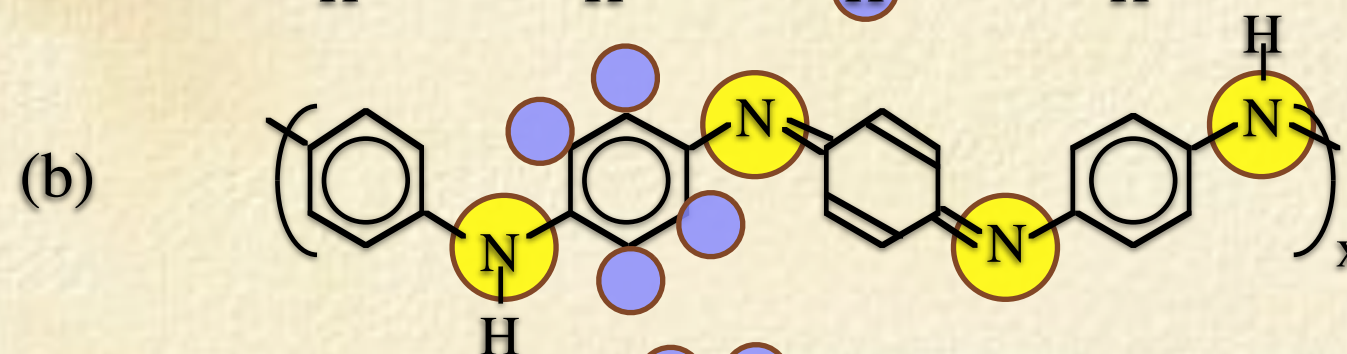


種々の導電性ポリマー

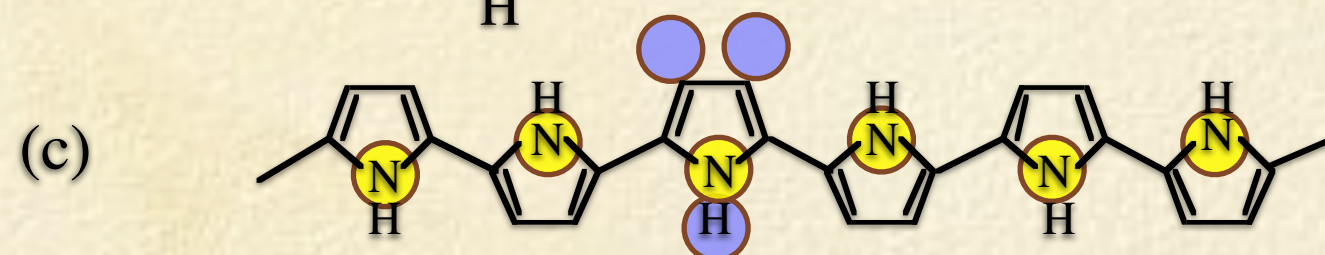
1車線の高速道路・・・！



t-PA
trans-Polyacetylene



PANI
Polyaniline



PPY
Polypyrrole

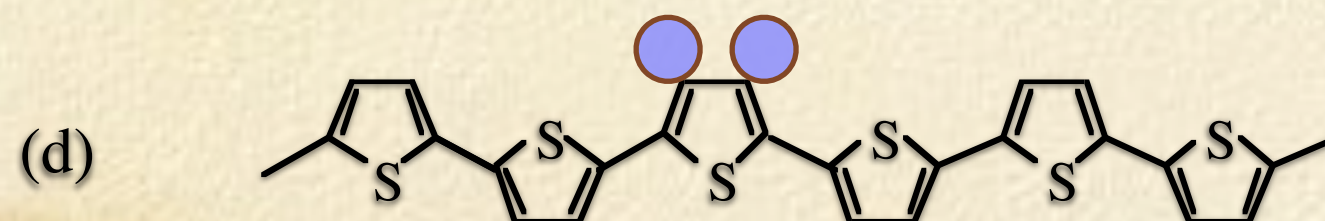
生命体の材料

炭素 C

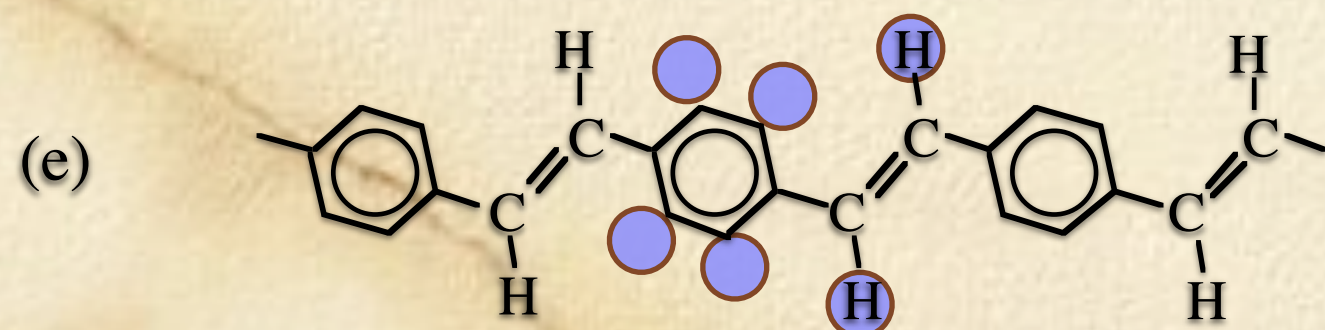
窒素 N

酸素 O

水素 H

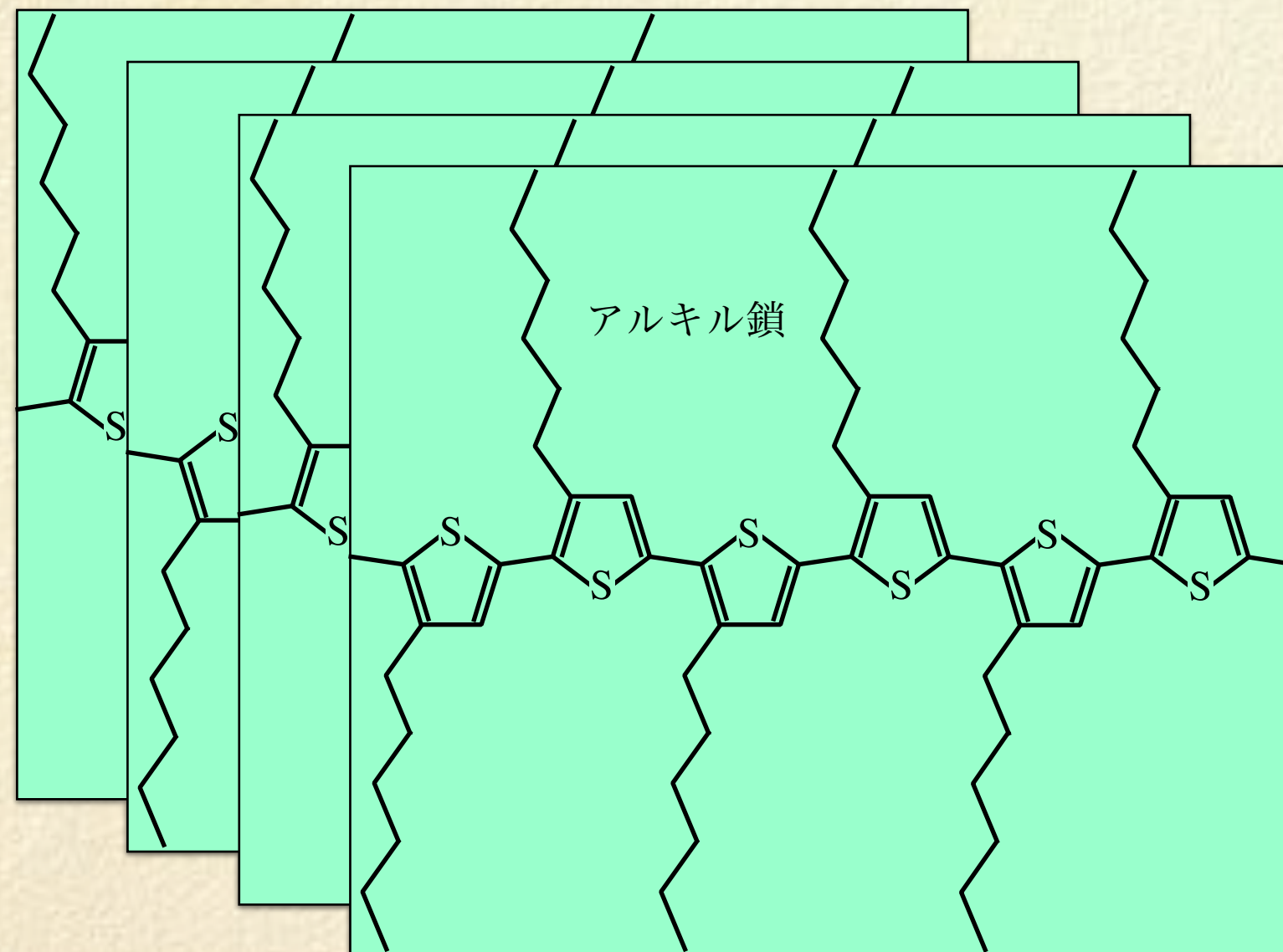


PT
Polythiophene



PPV
Poly-p-phenylene-vinylene

そろった導電性ポリマー



複数車線的高速道路・・・！

活発な電子の動きが特徴

電気が流れるか？流れないか？

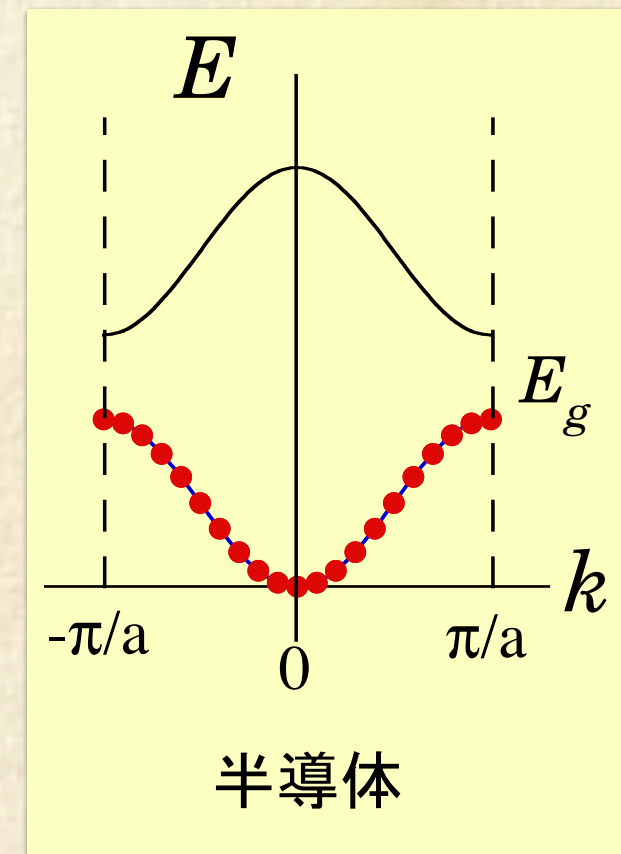
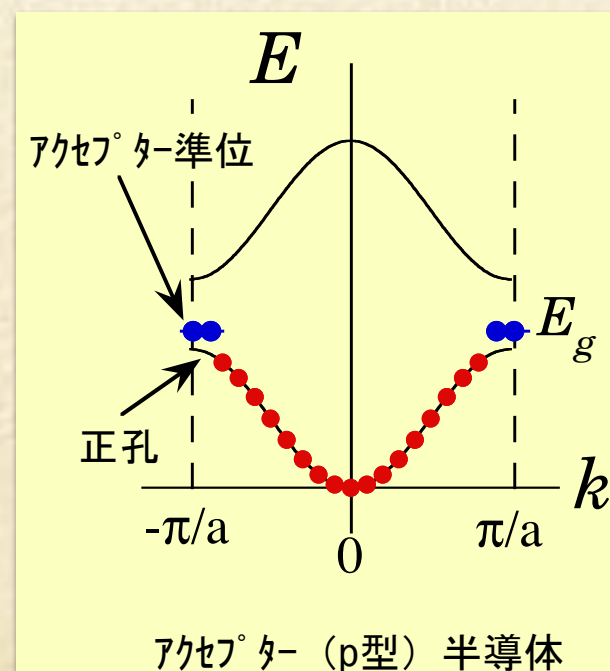
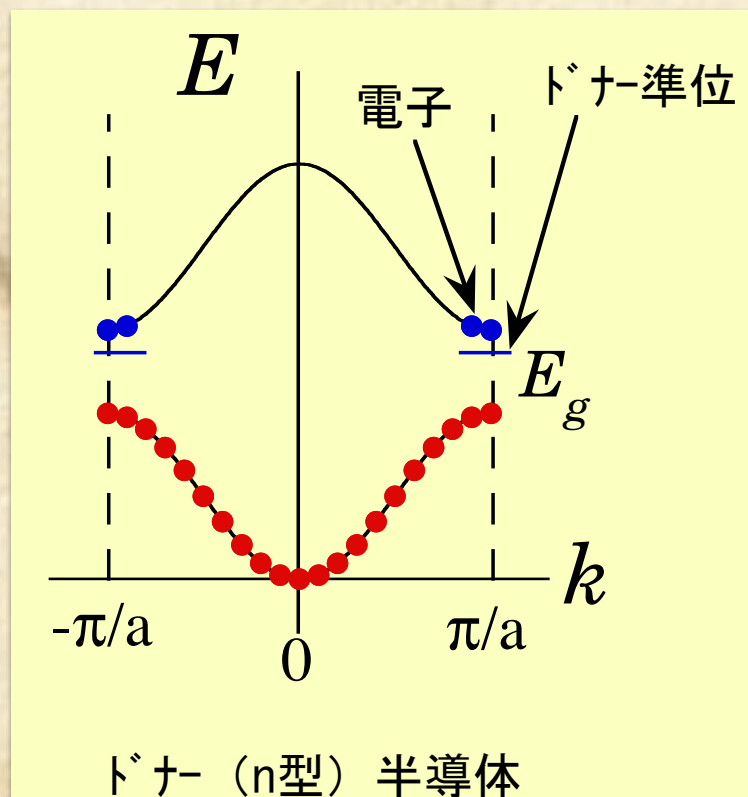
○ エネルギーギャップの大きさ

絶縁体と半導体

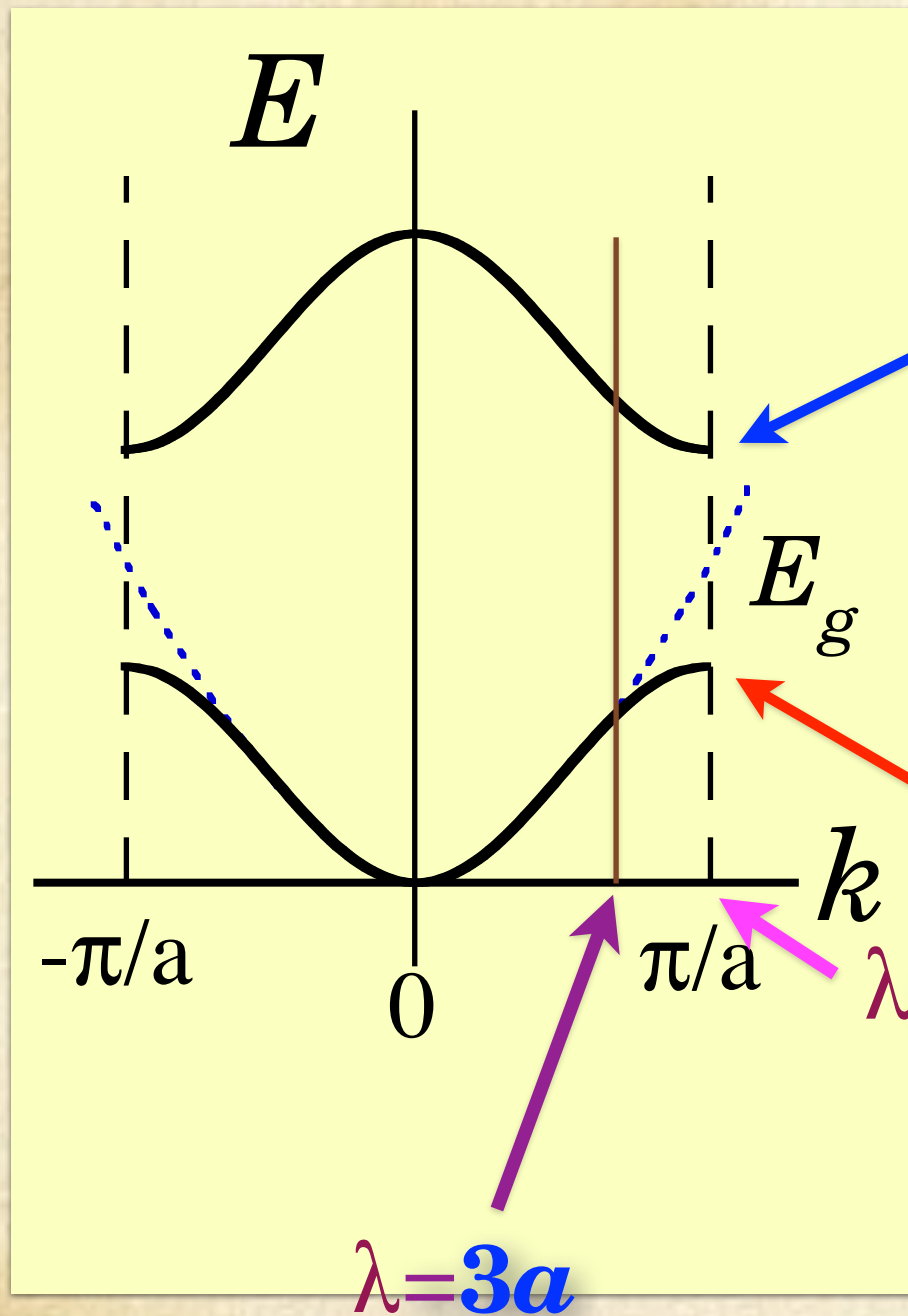
土台を支える「 σ 電子」 + 気ままな遊び人「 π 電子」

○ π 電子：電子の運動が変化できるスキマが必要

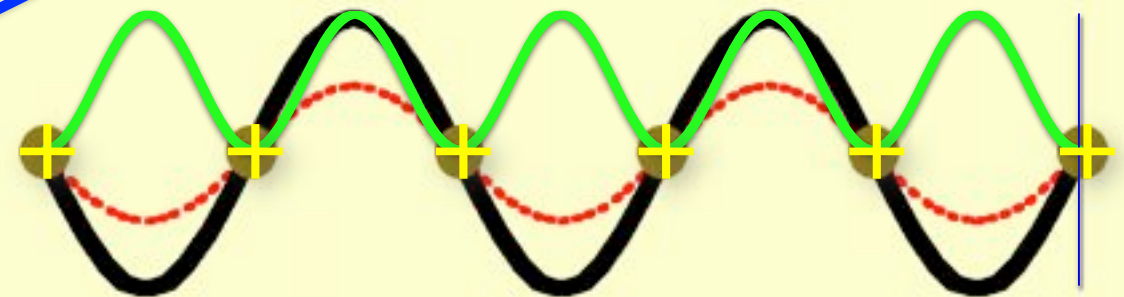
電子・正孔のドーピング



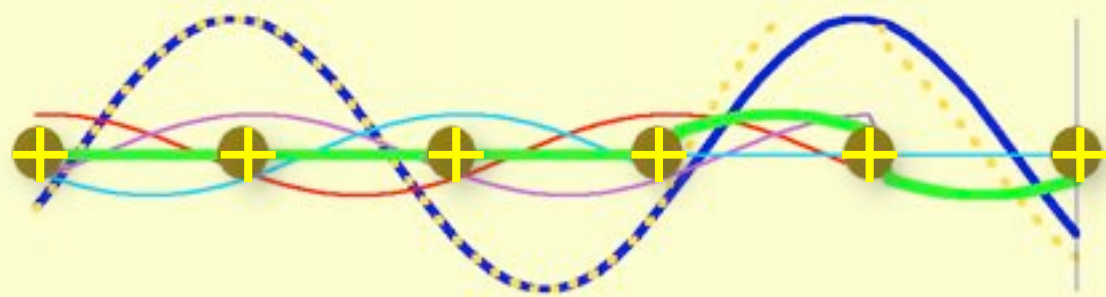
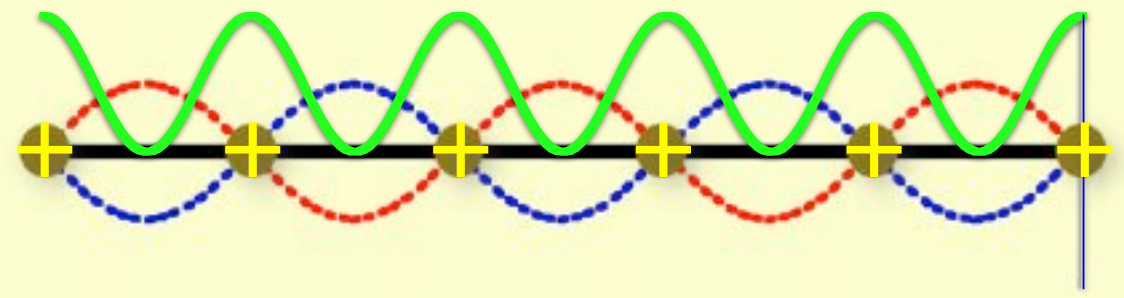
エネルギーバンドとギャップ E_g



イオン間に電子

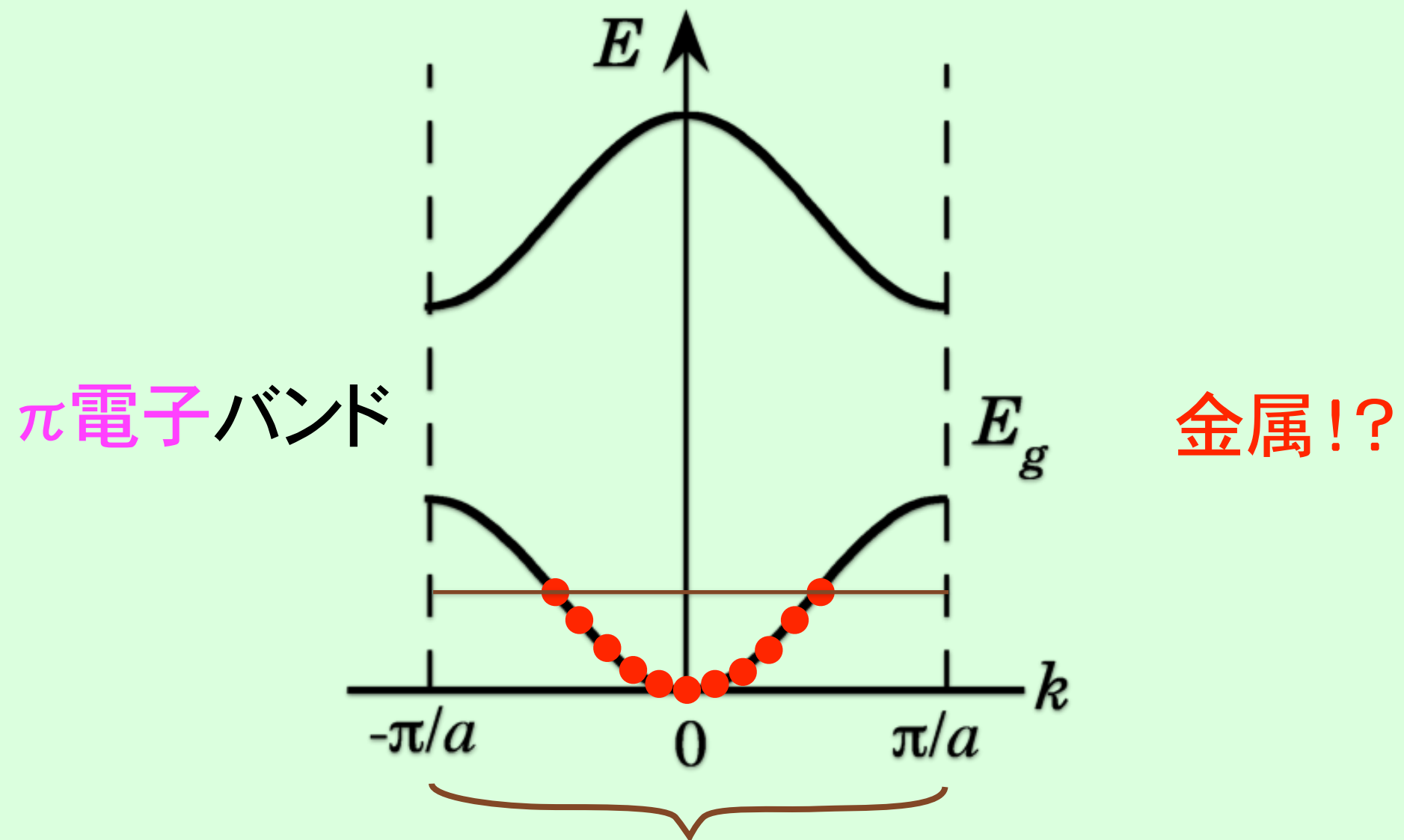


イオン上に電子



ポリアセチレン

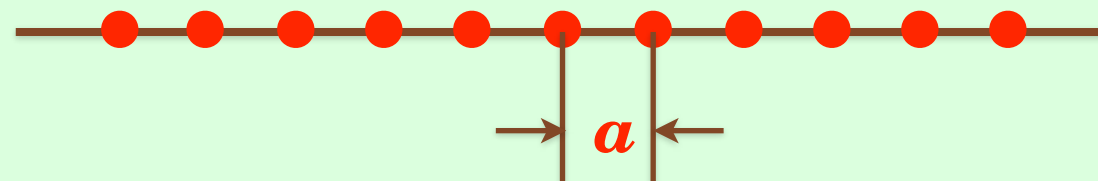
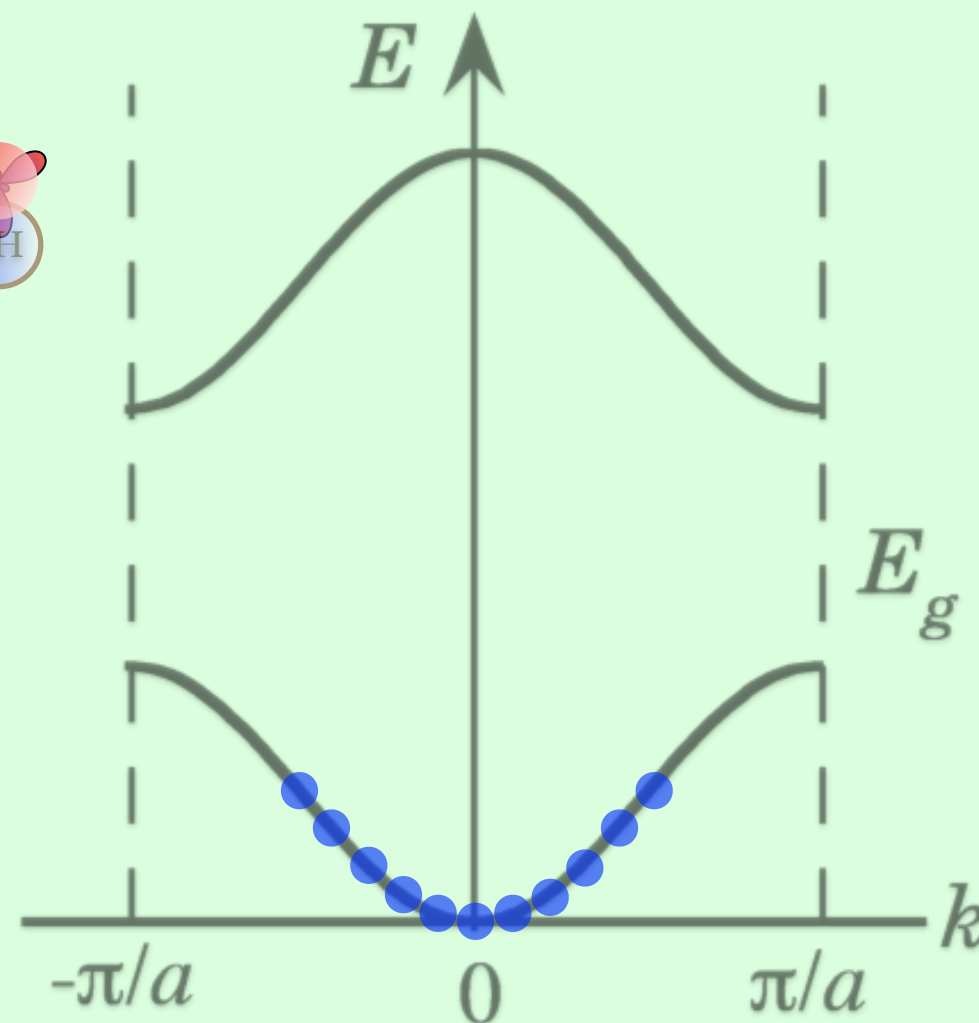
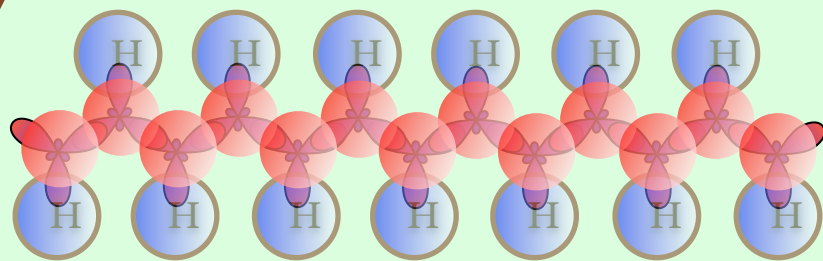
炭素原子 N 個に π 電子が N 個



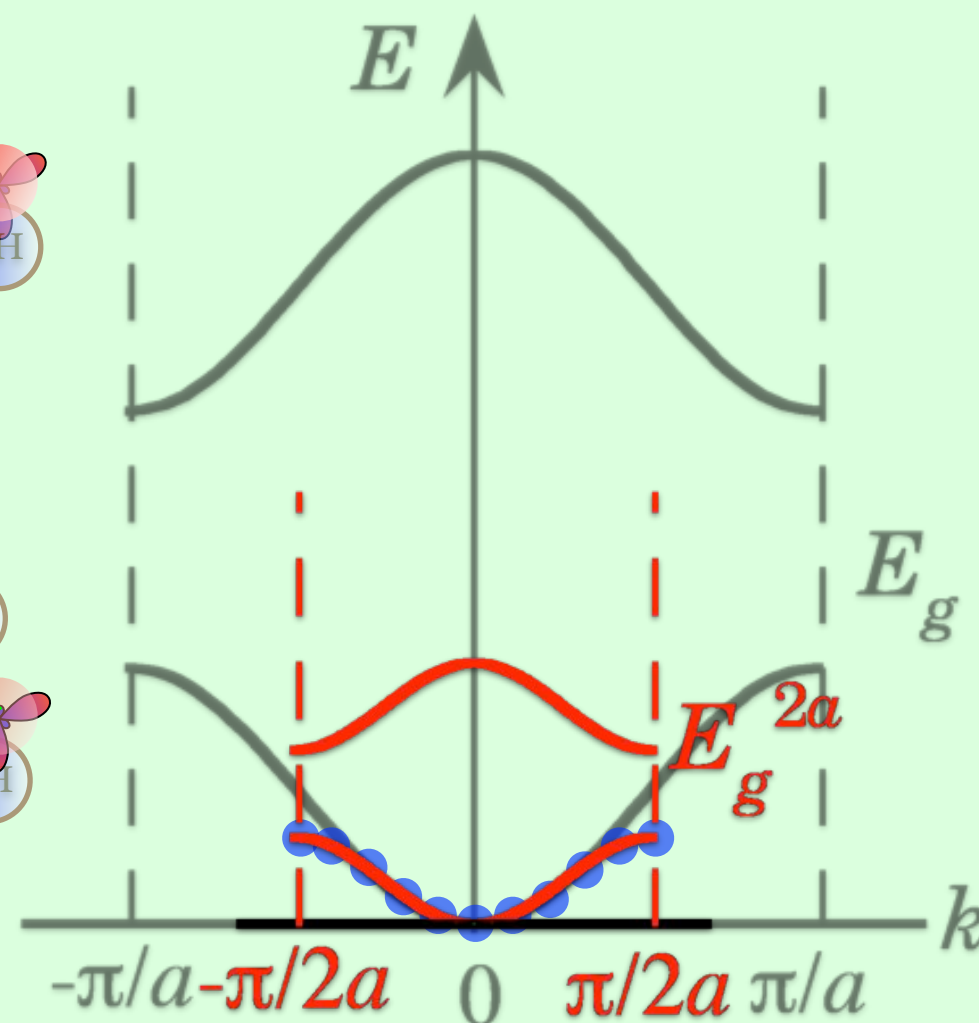
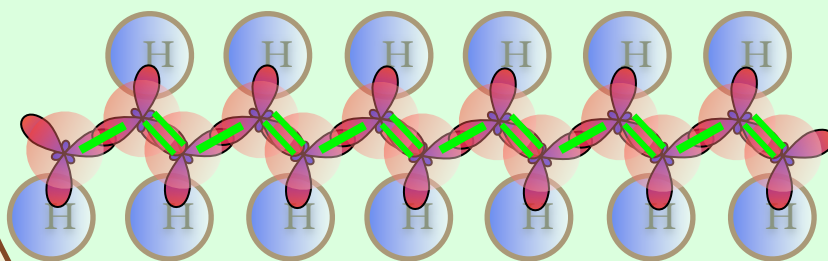
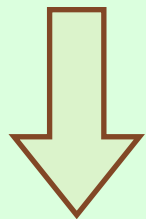
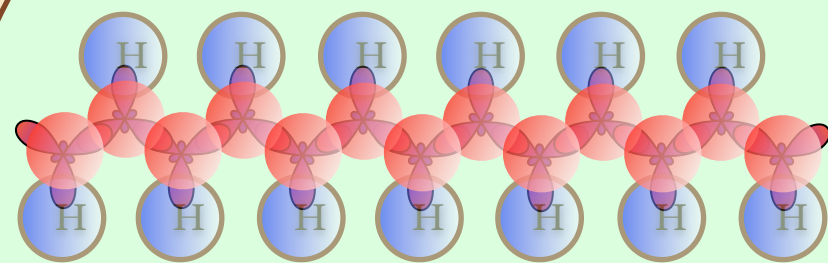
N 個の電子を収容可能
スピンの $\uparrow \downarrow$ で $2N$ 個

ポリアセチレン

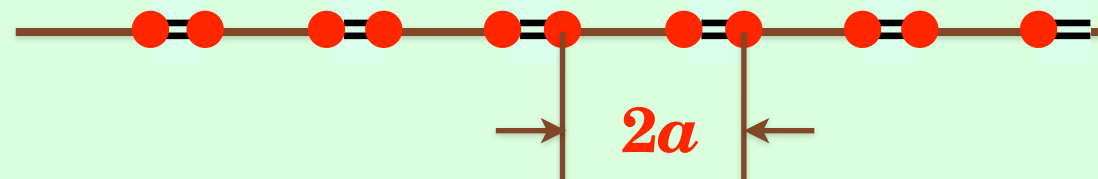
電荷密度波(CDW) による半導体化現象



ポリアセチレン

電荷密度波(CDW)
による半導体化現象1次元電子系に
必ず起こる相転移Peierls transition
パイエルス転移

2重結合



導電性高分子

そこで、

半導体 $\Rightarrow$ 導体

ドーピング

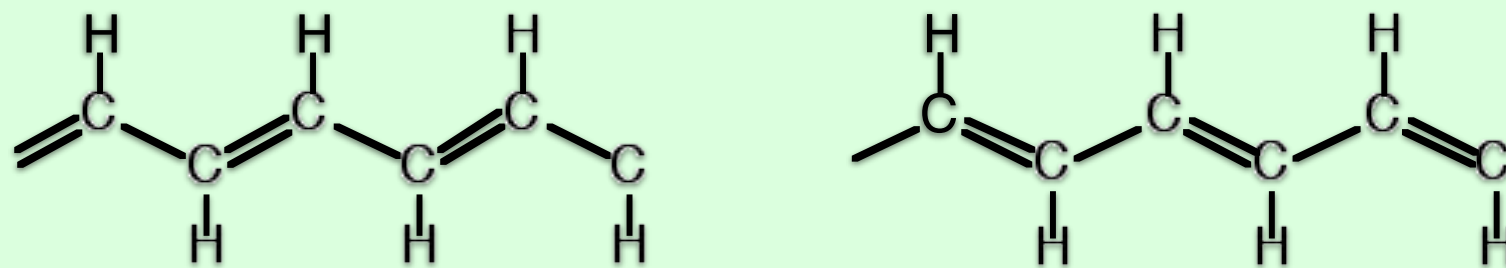
と

物理としての
面白さ

素励起

導電性高分子

エネルギーギャップ中の素励起



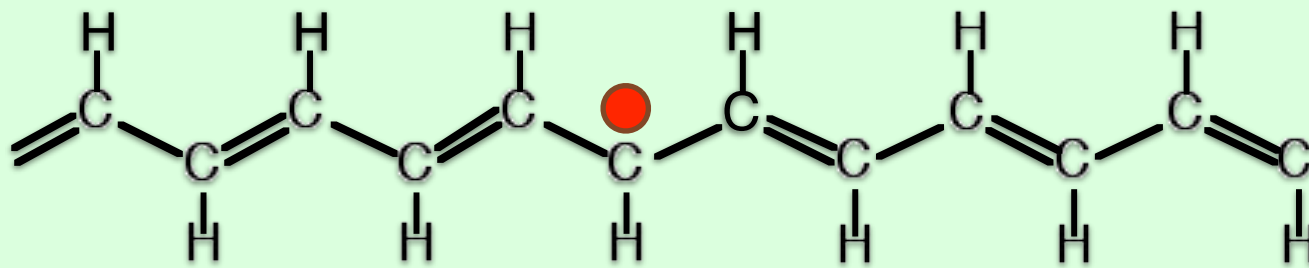
2つの構造のエネルギーが等しい

↓
縮退系

導電性高分子

エネルギーギャップ中の素励起

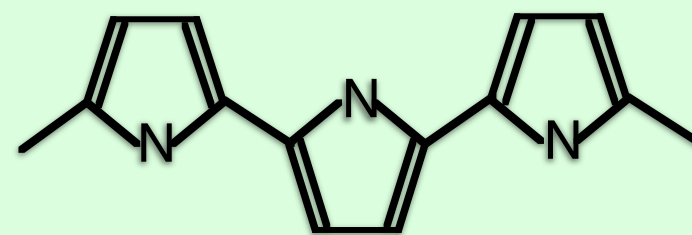
中性ソリトン



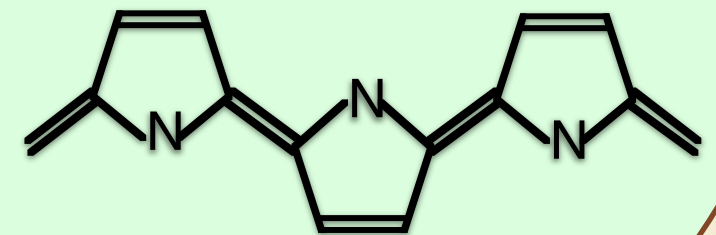
2つの構造のエネルギーが等しい



縮退系



芳香族型



キノイド型

2つの構造のエネルギーが異なる



非縮退系

導電性高分子 縮退系のソリトン

ソリトン

中性

正

負

$1/2$

0

0

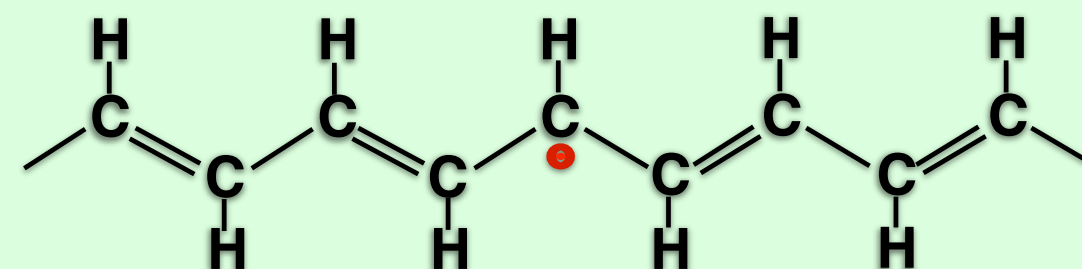
スピン

0

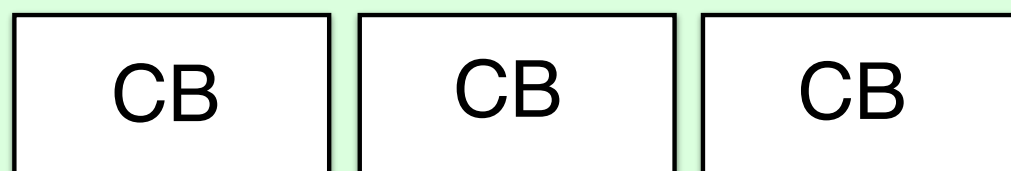
$+e$

$-e$

電荷



自由に動ける
結合交代の欠陥

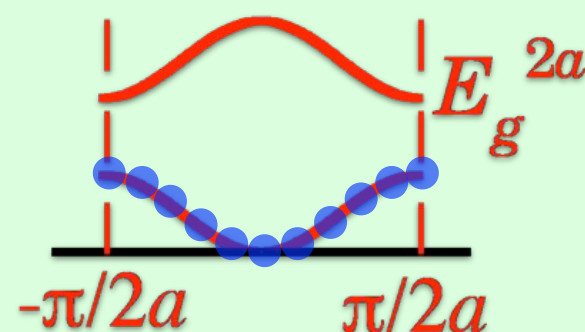


エネルギー
ギャップ E_g^{2a}



ソリトン

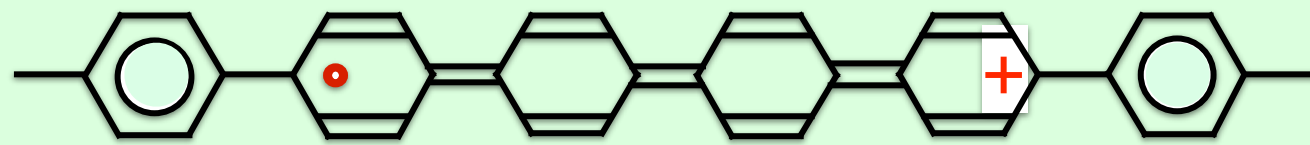
奇数個の炭素



導電性高分子

非縮退系のポラロン

非縮退共役高分子の正ポラロン



電子ドーピングによる
ポラロン生成

ポラロン

正

負

バイポラロン

正

負

スピン
電荷

$1/2$

$+e$

$1/2$

$-e$

0

$+2e$

0

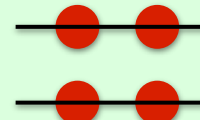
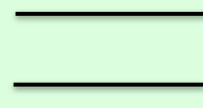
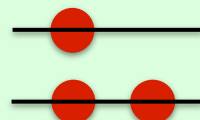
$-2e$

CB

CB

CB

CB



VB

VB

VB

VB

伝導帯

負荷電
ポラロン

エネルギー
ギャップ E_g

価電子帯

ドーピングにより結合交代が
緩んで、ギャップが減少する

半導体の応用素子の例

1. pn型接合ダイオード
2. 発光ダイオード
3. 太陽電池

半導体の応用素子の例

1. pn型接合ダイオード
2. 発光ダイオード
3. 太陽電池

有機電界発光(EL)ディスプレイ

明るい

きれいな

軽い

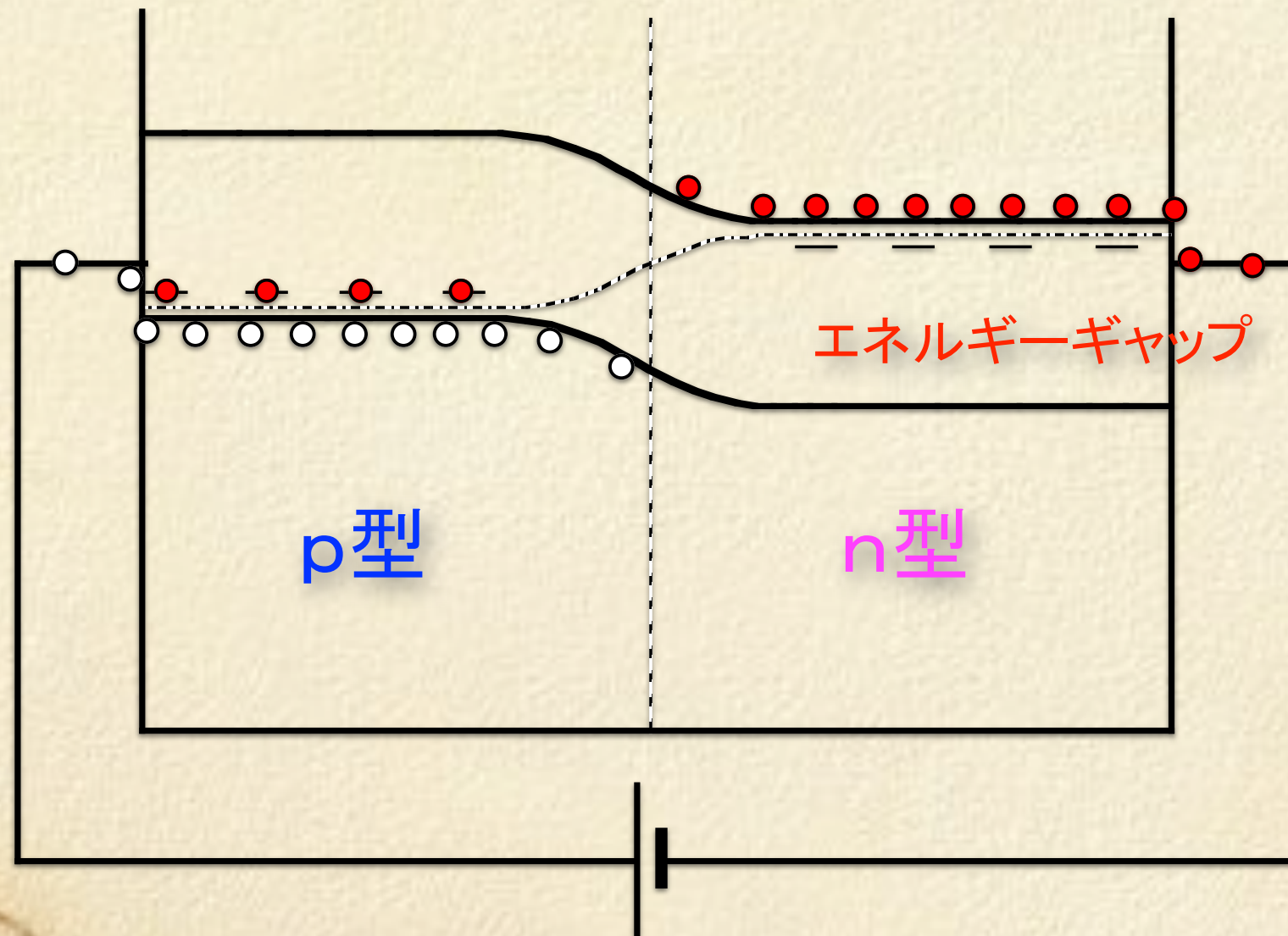
安い(期待)

フレキシブル

薄型軽量、低消費電力、高コントラスト、広視野角、高速応答、高色再現が
可能な自発光タイプの表示素材

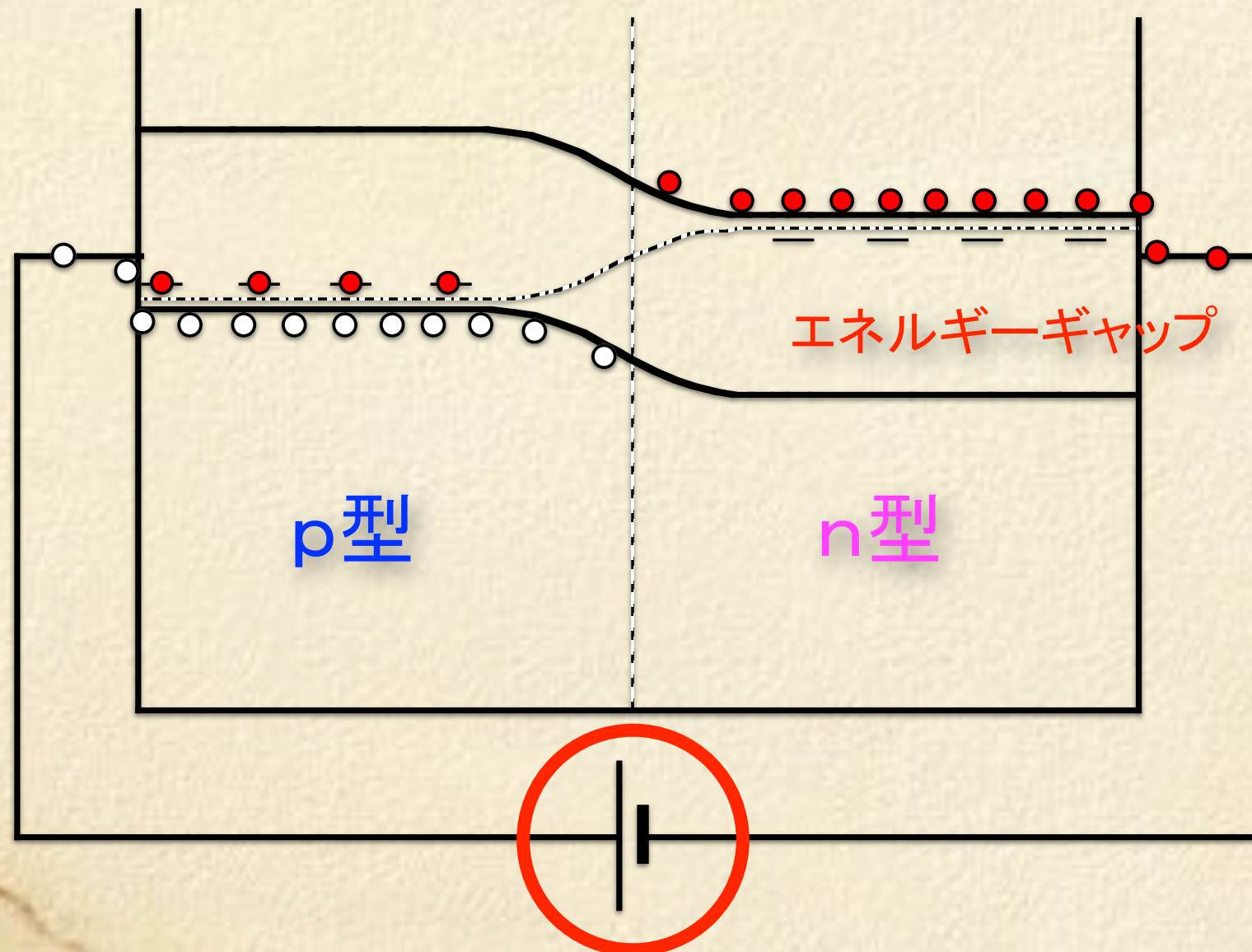
電界発光の原理

電子—正孔の対消滅が光に



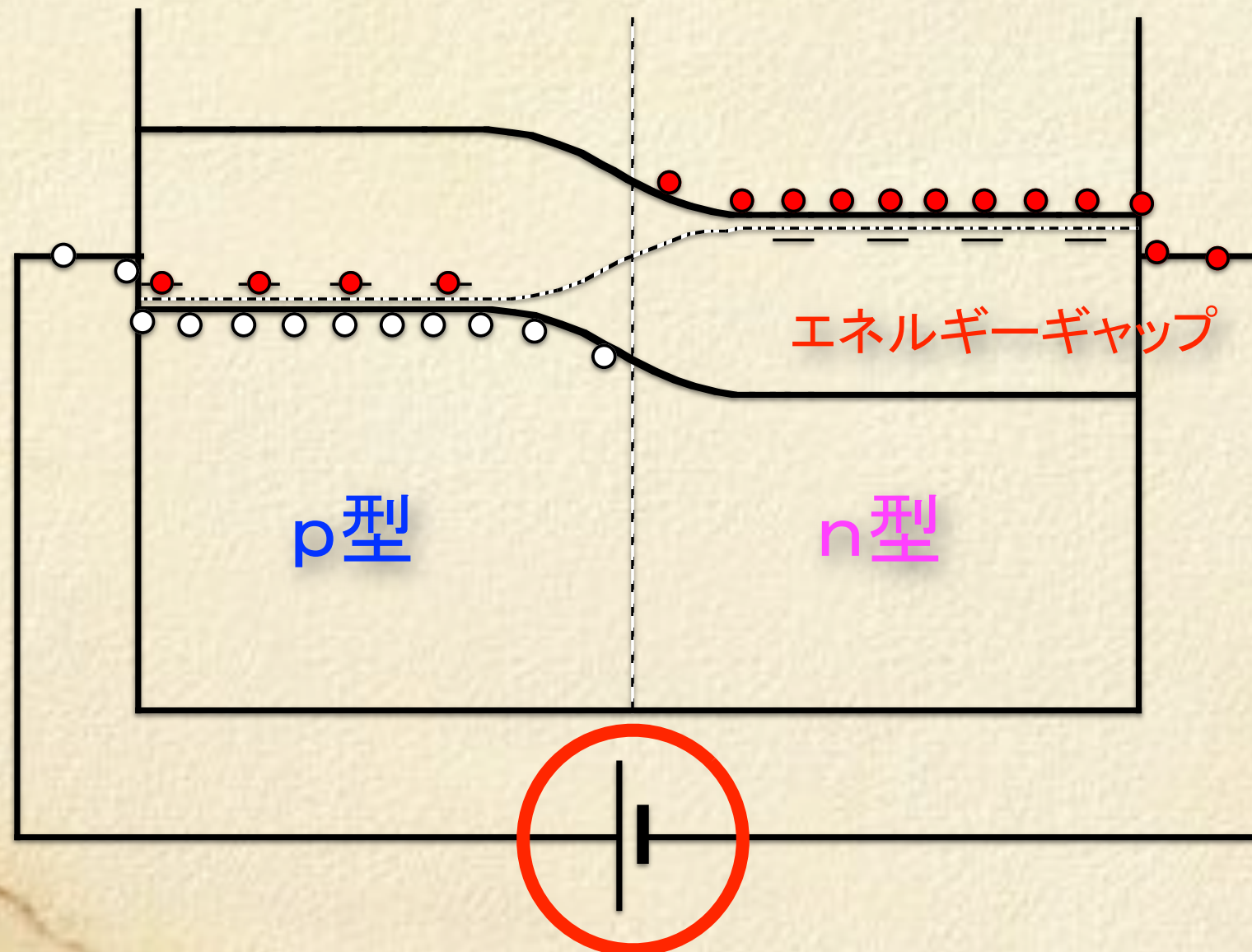
電界発光の原理

電子—正孔の対消滅が光に



電界発光の原理

電子—正孔の対消滅が光に

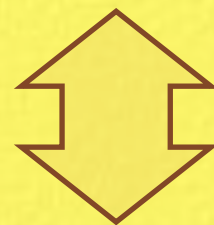


発光の色は？

エネルギーギャップ E_g

出てくる光の振動数: $f = E_g/h$ ($E=hf$)

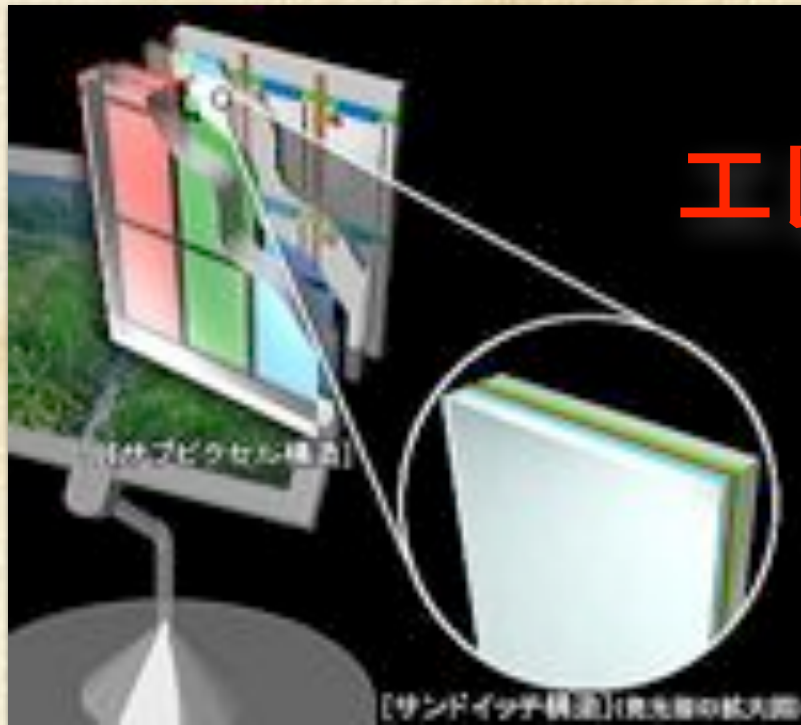
エネルギーギャップの大きさ E_g



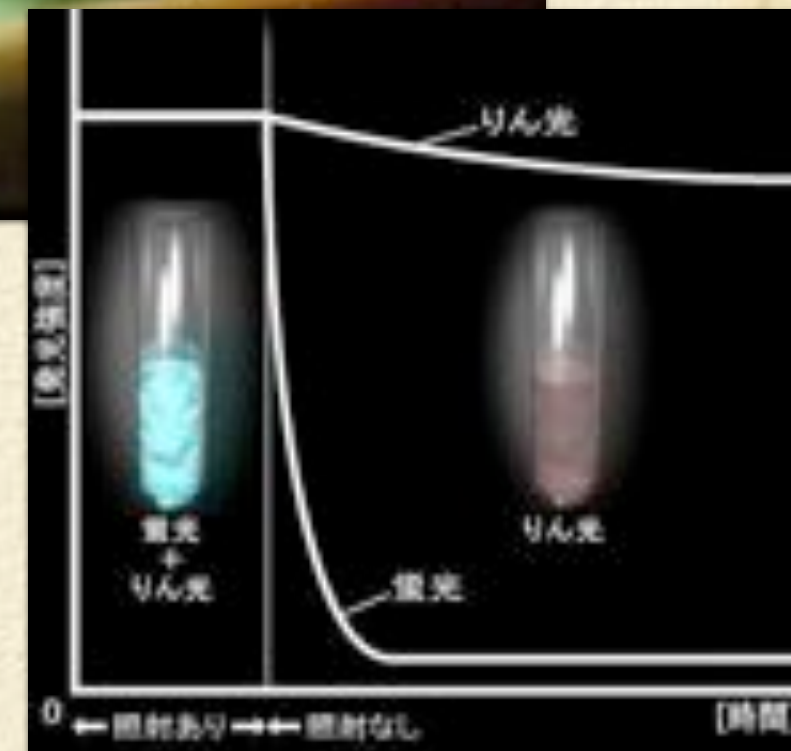
発光する色: 赤・青・緑

発光の色々

エレクトロルミネッセンス



ケミルミネッセンス



フォトルミネッセンス ルビーの輝き

液晶ディスプレイとの比較

有機ELディスプレイ

特徴

自発光

高輝度(600cd/m^2)

視野角(360度も！)

早い応答性(μsec)

省エネ($<1/2$)

高いコントラスト($\sim\infty$)

薄い(2-4mm)

液晶ディスプレイ

残された問題点

光源が必要(最近はLED)

輝度(300cd/m^2)

視野角(170度)

応答性(msec)

電力

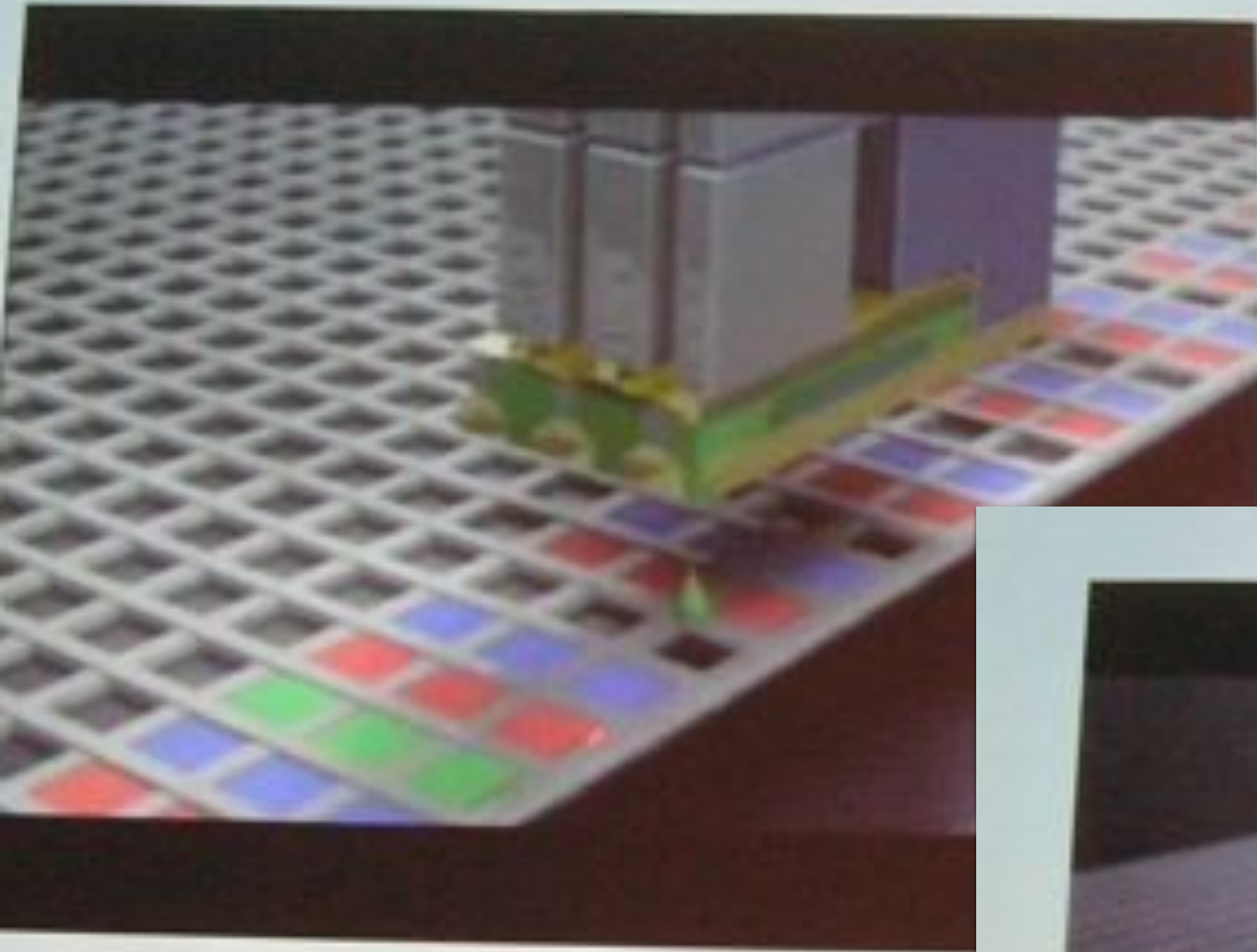
コントラスト($<5,000$)

厚い(15-20mm)



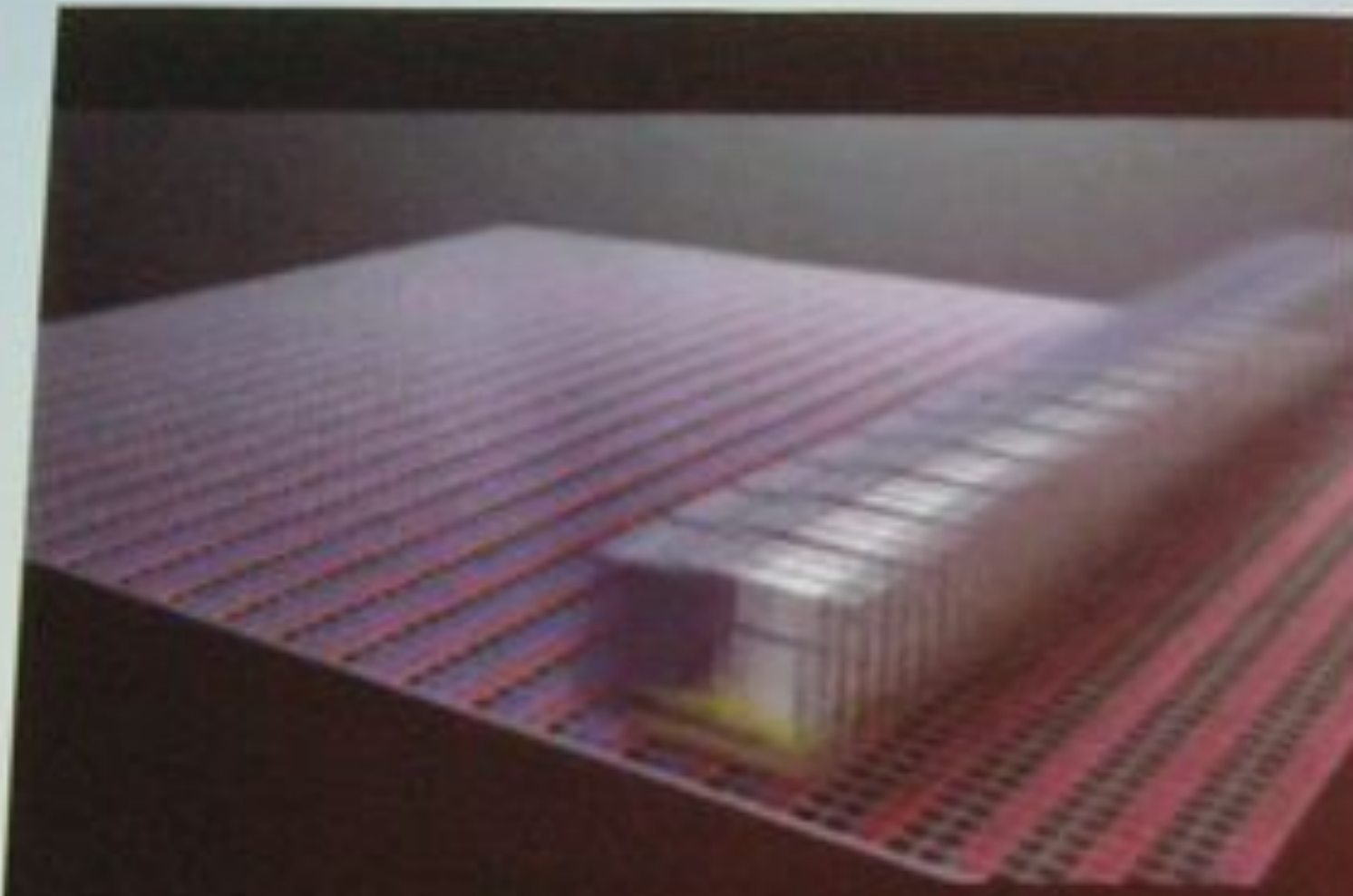


インクジェットによる発光素子の作成



各発光素子の裏には、TFTの駆動回路

インクジェットで発光材料を吐出する様子は、まさにプリンタそのもの



エプソン、40型有機ELディスプレイを開発 ～インクジェット技術を応用

2004年5月



● エプソン独自のインクジェット技術
(マイクロピエゾヘッド技術)の活用

非加熱方式の技術のためインクジェットプリンタヘッドの
工業応用が容易

➢ 大面積バターニングが可能

➢ 1200 mm x 820 mm

➢ 高精細バターニングが可能

➢ 2,880 dpi

➢ 発光材料の有効利用

➢ 必要な画素にだけ吐出

(オンデマンドプリンティング)





公開された40型有機ELディスプレイ
試作機。パネル上に十字の継ぎ目が見
えるが、これは小型の基板を貼り合わ
せているため。成膜自体は40型での
一括形成が可能

横から見たところ。薄型で、広視野角
なのが確認できる



超薄型テレビも実現可能に

2005年5月



世界初の 有機ELテレビ



2007年10月





高いコントラスト比：
>1,000,000



高い輝度：600 cd/m²

早い応答時間：
数 μ s



高い色再現性：NTSC 110 %



ジャパンディスプレイ（JDL）が公開した有機ELの試作パネル。ディスプレイを曲げた状態で画面が表示されている。

2014 CES





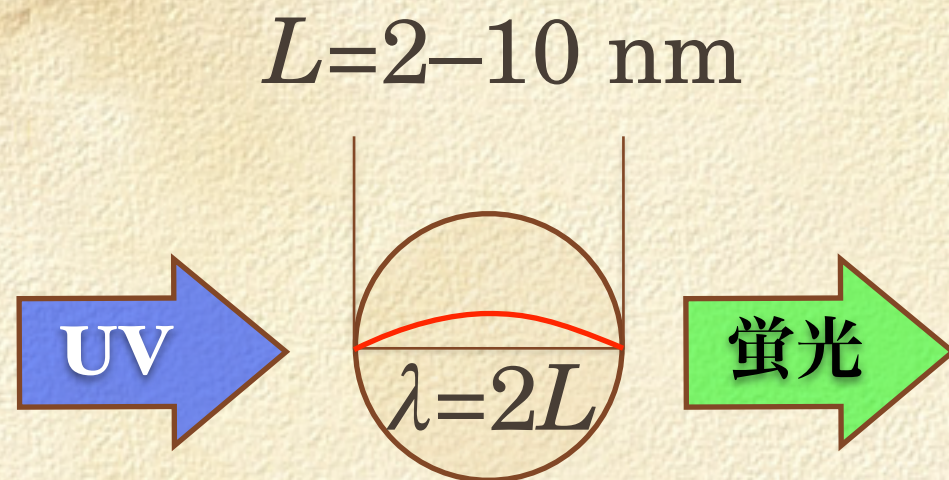
**LG：マグネットで
壁に貼付けるTV**

Quantum Dots

量子ドット

2–10 nm のCdSe等の半導体微粒子

対称性の高い三原色スペクトル



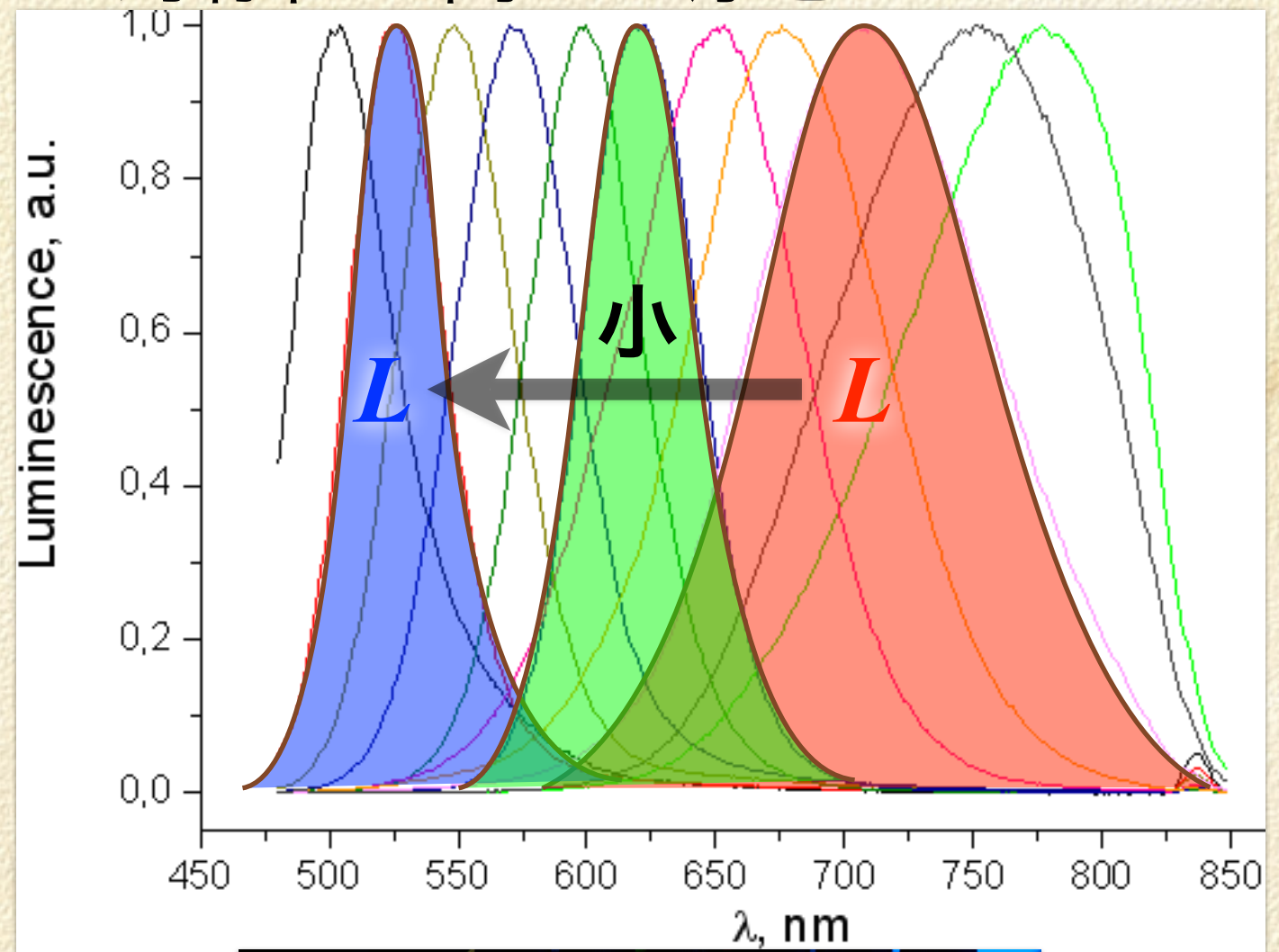
100-10,000 電子

電子のエネルギー

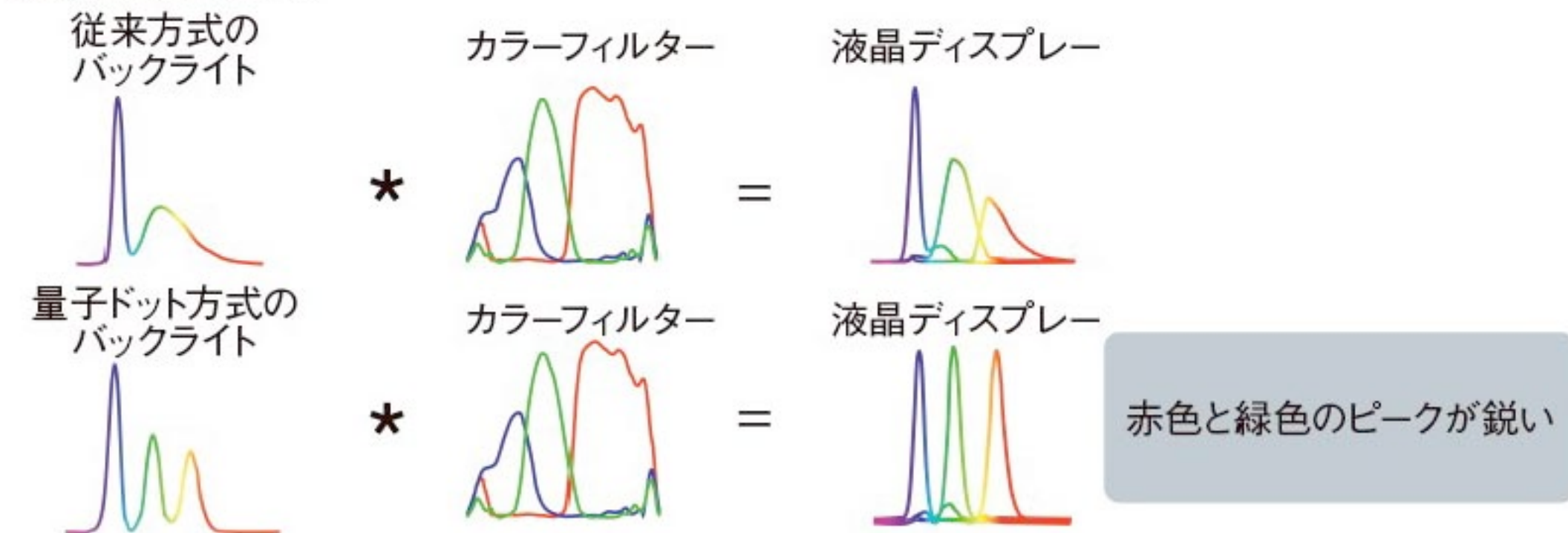
$$E = mv^2/2$$
$$= p^2/2m \quad (p = h/\lambda)$$

$$= h^2/2m\lambda^2$$

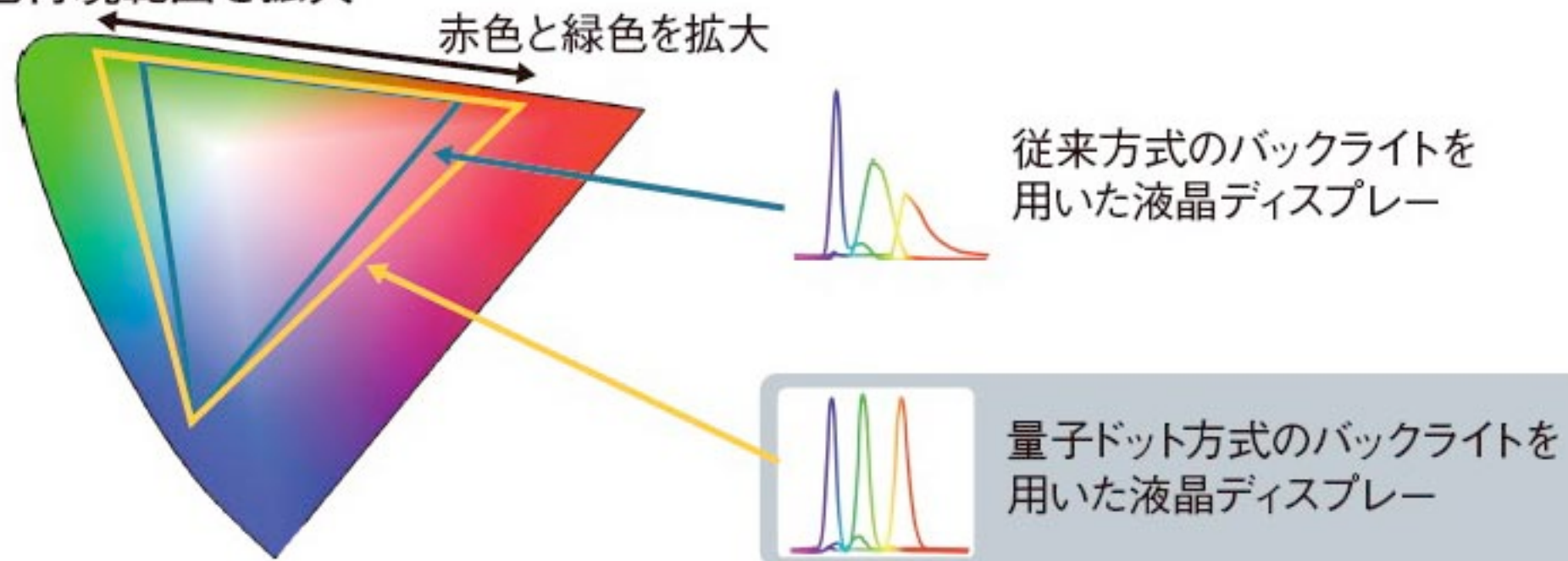
$$\Rightarrow E \propto 1/L^2$$



(a) 光のスペクトル



(b) 色再現範囲を拡大



2013年

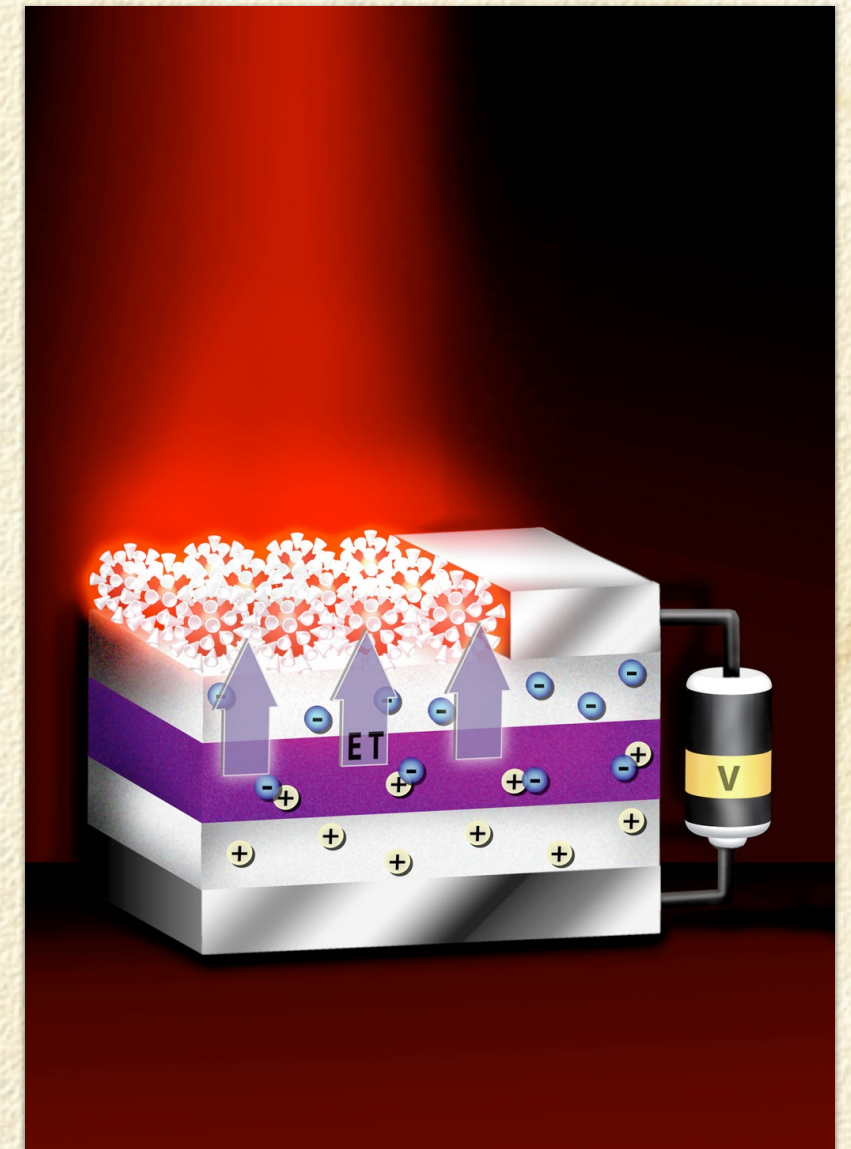
TRILUMINOUS Display

Sony XBR X900A series



Color boost: You can't tell, if you're looking at this on a conventional display, but the colors in Sony's new quantum-dot TV are stunning.

<https://www.technologyreview.com/s/509801/quantum-dots-get-commercial-debut-in-more-colorful-sony-tvs/>



<http://www.sandia.gov/news-center/news-releases/2004/micro-nano/well.html>

High Picture Quality Demo Area

Unleash your senses in 4K

VIERA

WIDE COLOR AND BRIGHTNESS

Panasonic

Ultra Bright Panel

Boosts Brightness for Crisper, More Dynamic Pictures

Because of the types of light they use and the need to limit brightness to enhance contrast, LCD TVs can lack optimum brightness even when set up to look their best. Ultra Bright Panels combine a new panel structure designed to let light through more effectively with a highly efficient backlight system to increase brightness by over 40%.

High Transmittance Panel

+

High-Efficiency LED Backlight

over
40%
increase in Brightness

DCI 98% Color Space

Advanced LED Backlight Design Produces a Wider Color Range

Panasonic LCD TVs with Wide Color Phosphor Technology cover up to 98% of the DCI standard. For viewers, the result is more subtle tones and a natural, true-to-life color palette.

Wide Color Phosphor Technology

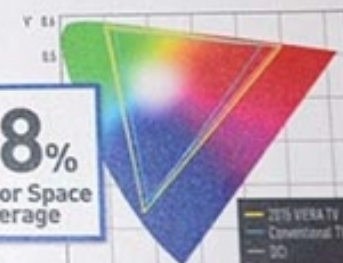
+

Advanced LED Backlight

+

New Color Filter

98%
DCI Color Space Coverage



Panasonic.com/CES

HIGH DYNAMIC RANGE

Panasonic

High Dynamic Range

The high-brightness data that is recorded when shooting is used directly to faithfully reproduce images in their original brightness.

Standard Dynamic Range

Data is graded using the regulations (brightness upper limit: 100 nits) of the present broadcast standard (bt.709), and the high-brightness component is averaged to display the image.

Shooting



Grading and Encoding



日本 (Panasonic) の戦略



OLE light



半導体の応用素子の例

1. pn型接合ダイオード
2. 発光ダイオード
3. 太陽電池

プラスチック太陽電池

軽い

安い

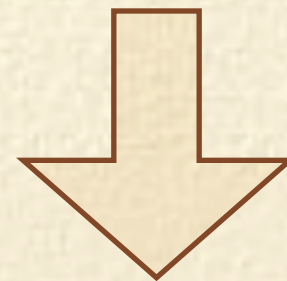
フレキシブル

太陽電池の原理

太陽光のエネルギー $h\nu$

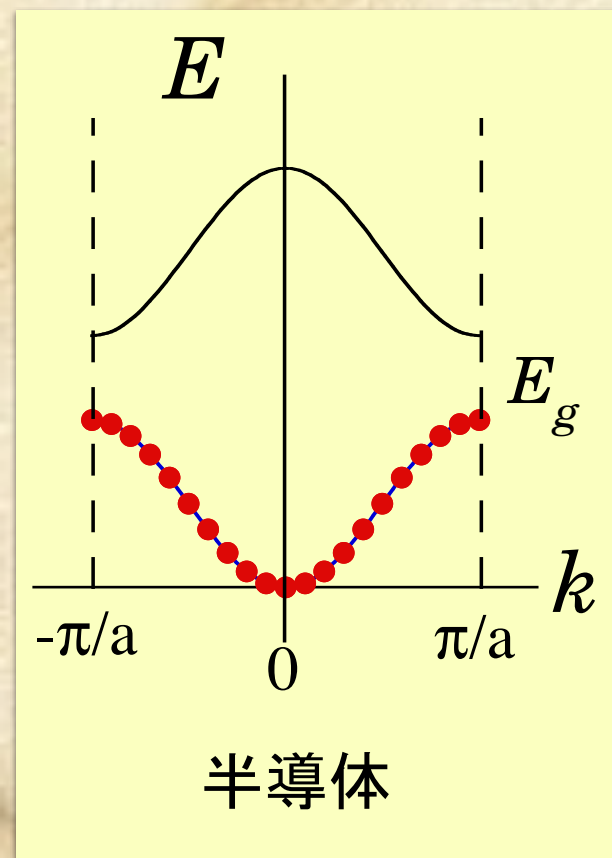
$$hf = \downarrow \text{エネルギーギャップ } E_g$$

電子—正孔対の生成

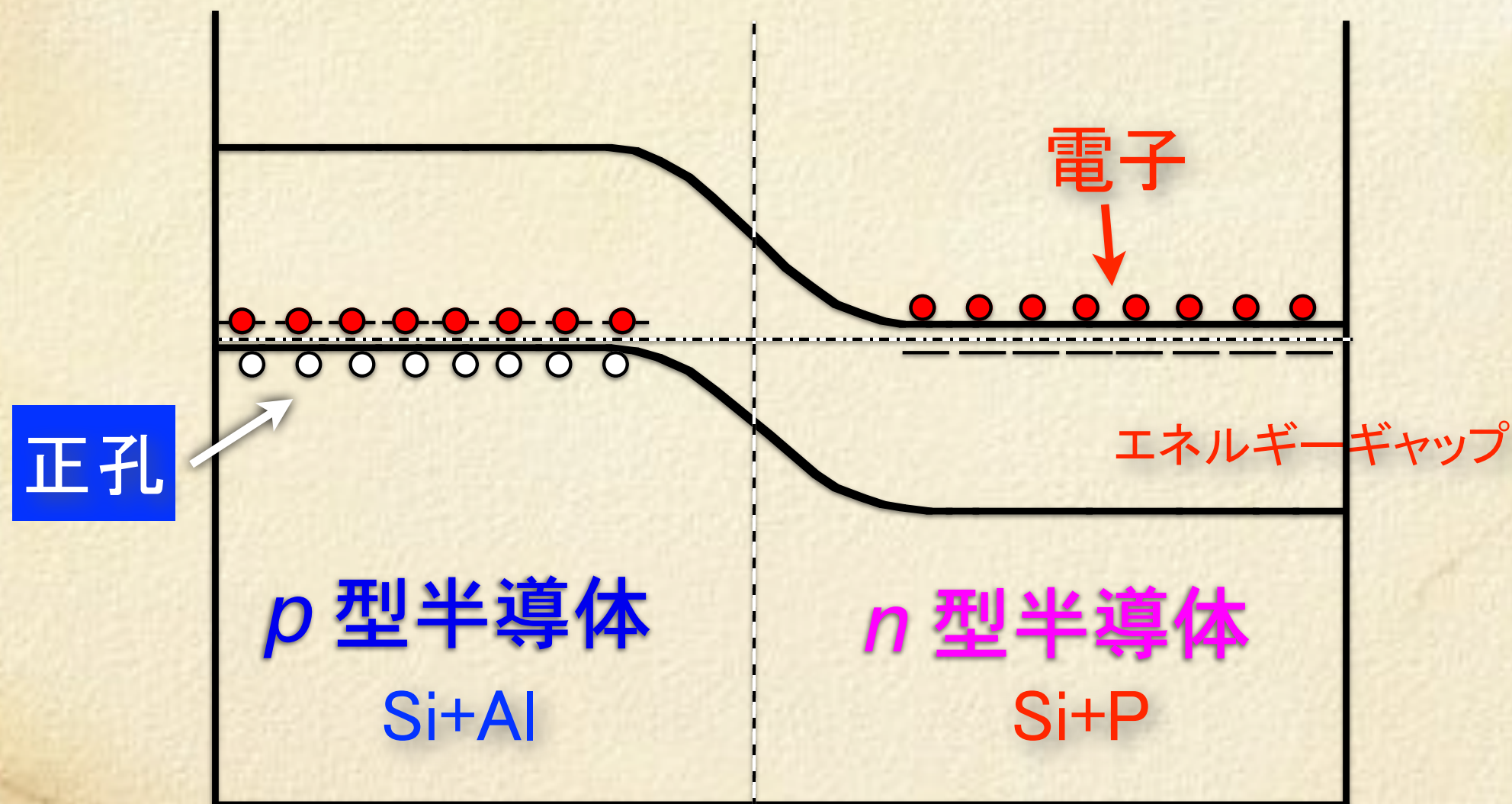


電荷（電子、正孔）の分離

起電力の発生

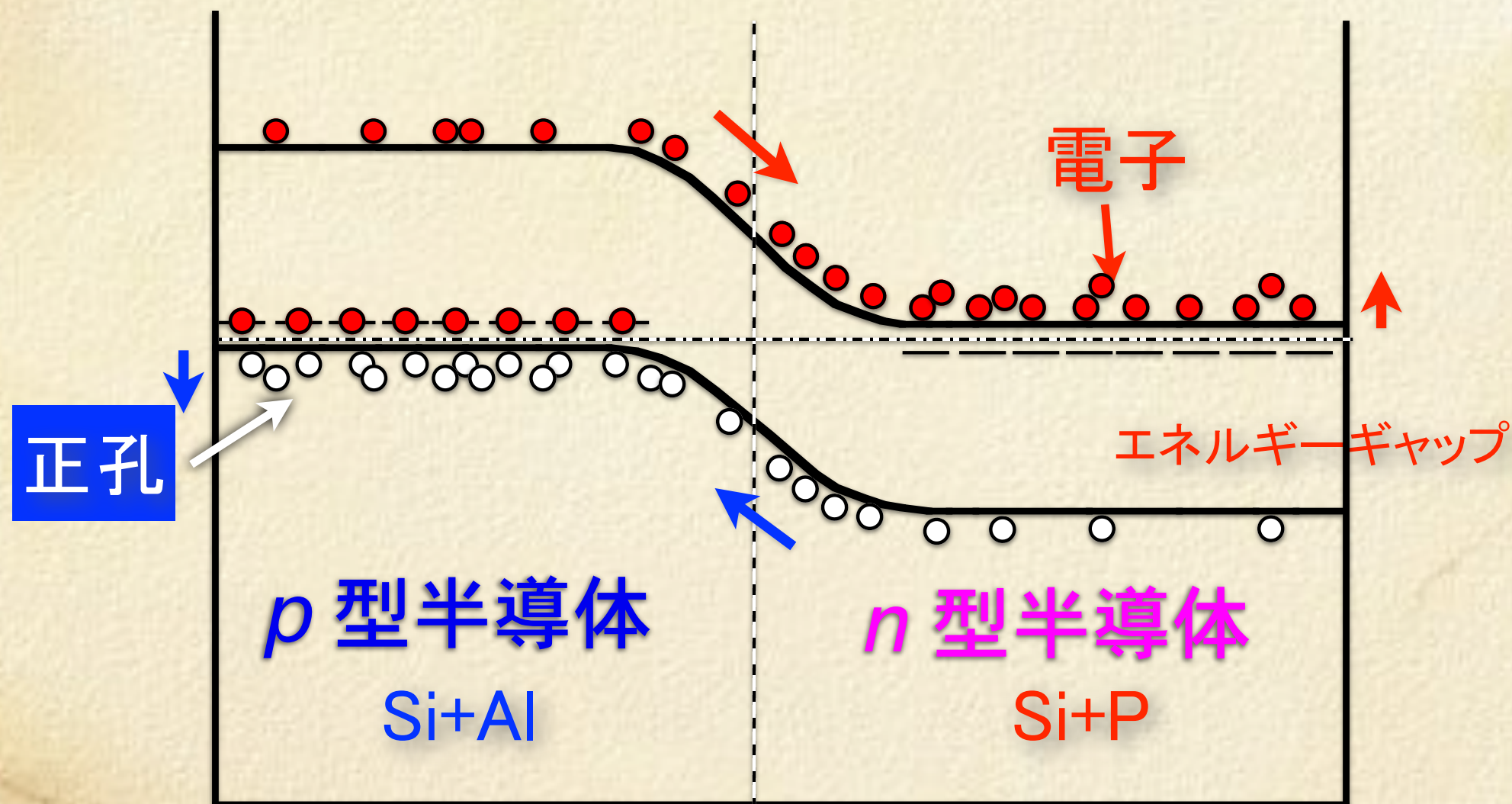


太陽電池の原理



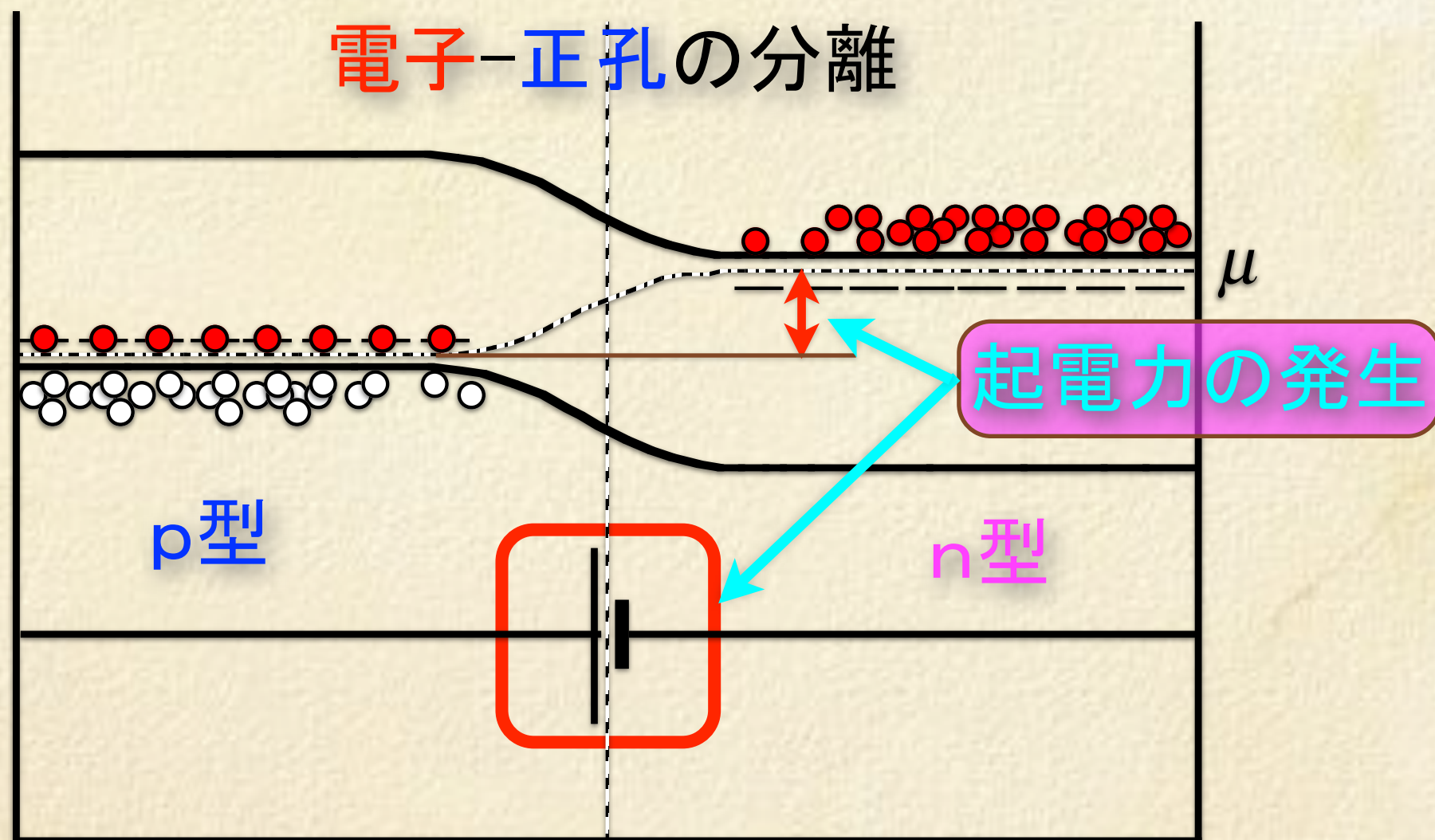
光のエネルギーを受け、電子がエネルギーギャップを上がる

太陽電池の原理

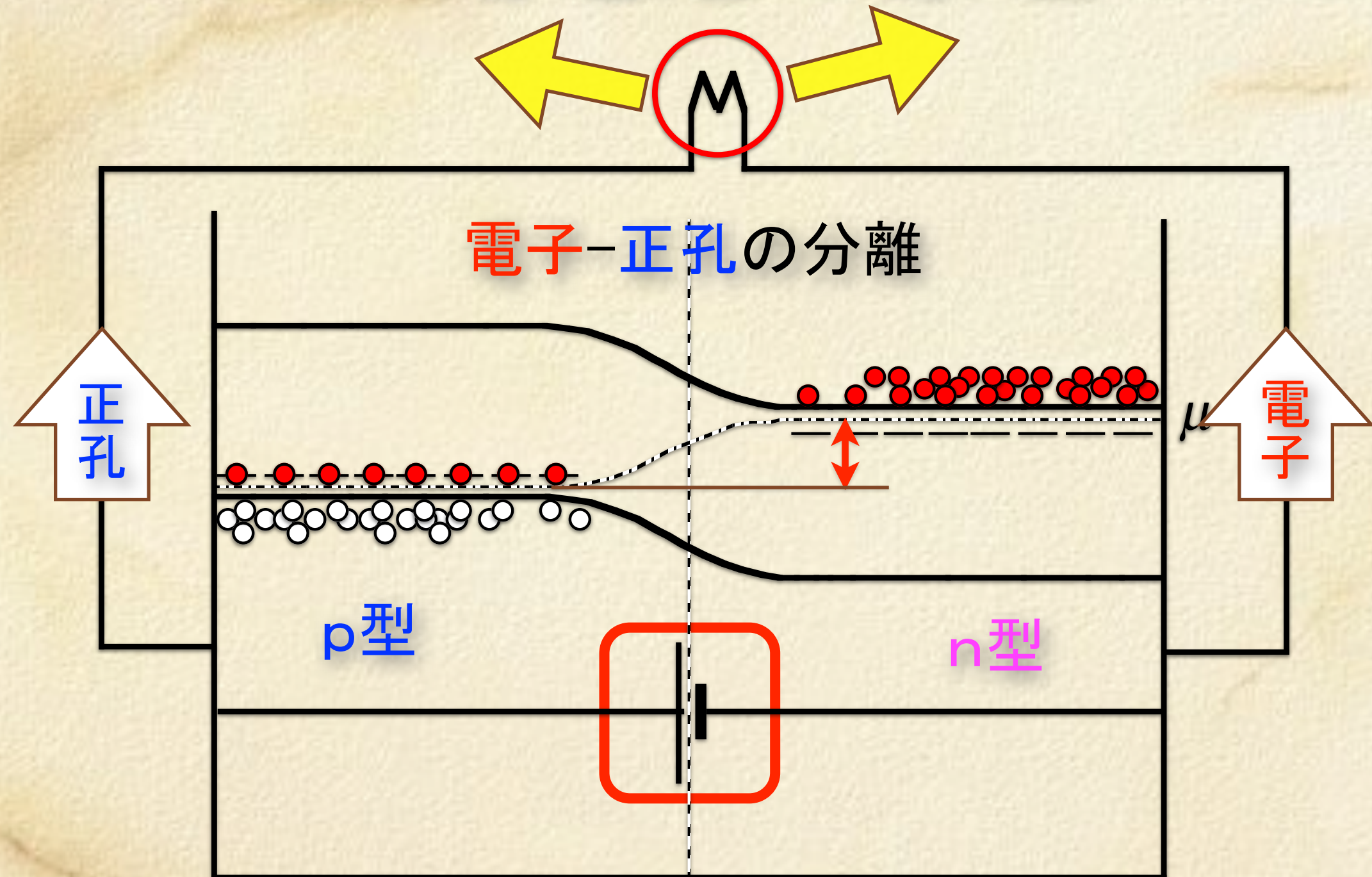


光のエネルギーを受け、電子がエネルギーギャップを上がる

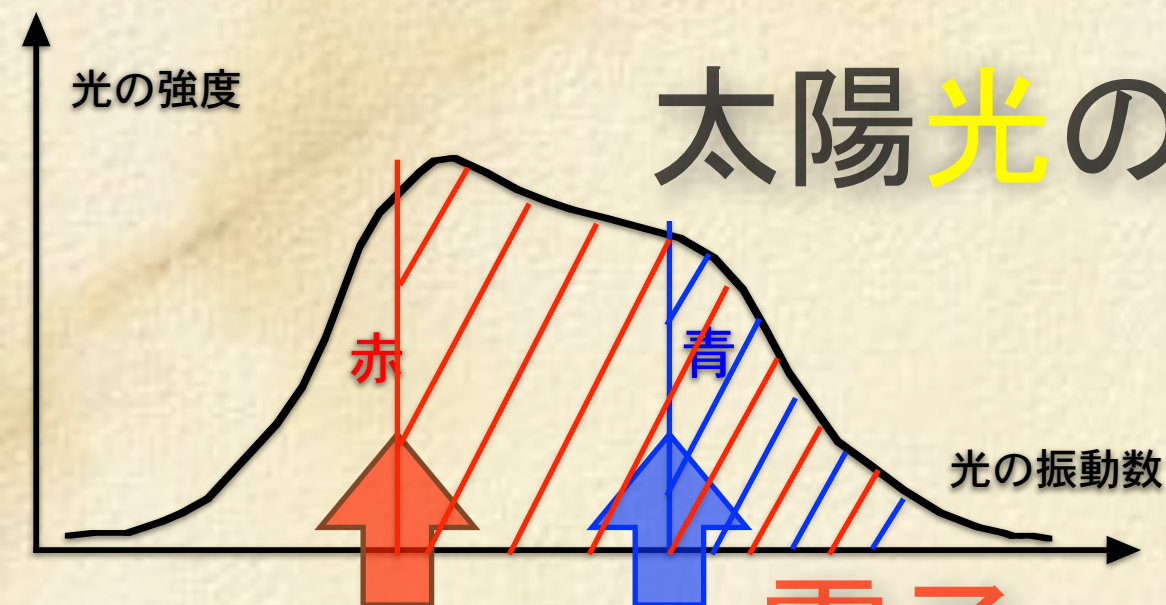
太陽電池の原理



太陽電池の原理



太陽電池の変換効率

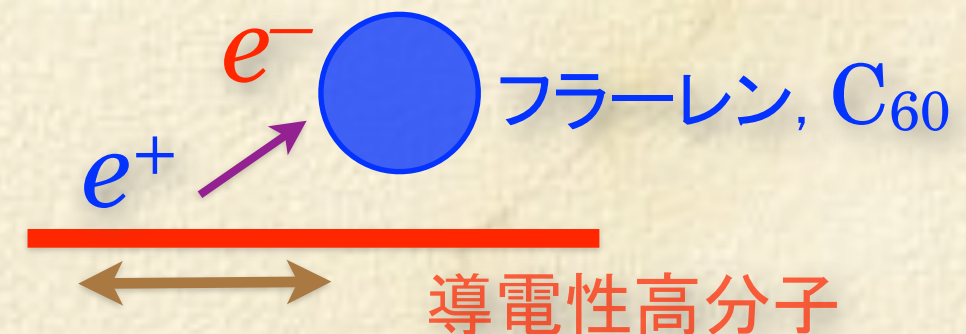


太陽光のエネルギー $h\nu$

太陽光のスペクトルにマッチしたエネルギーギャップの分布

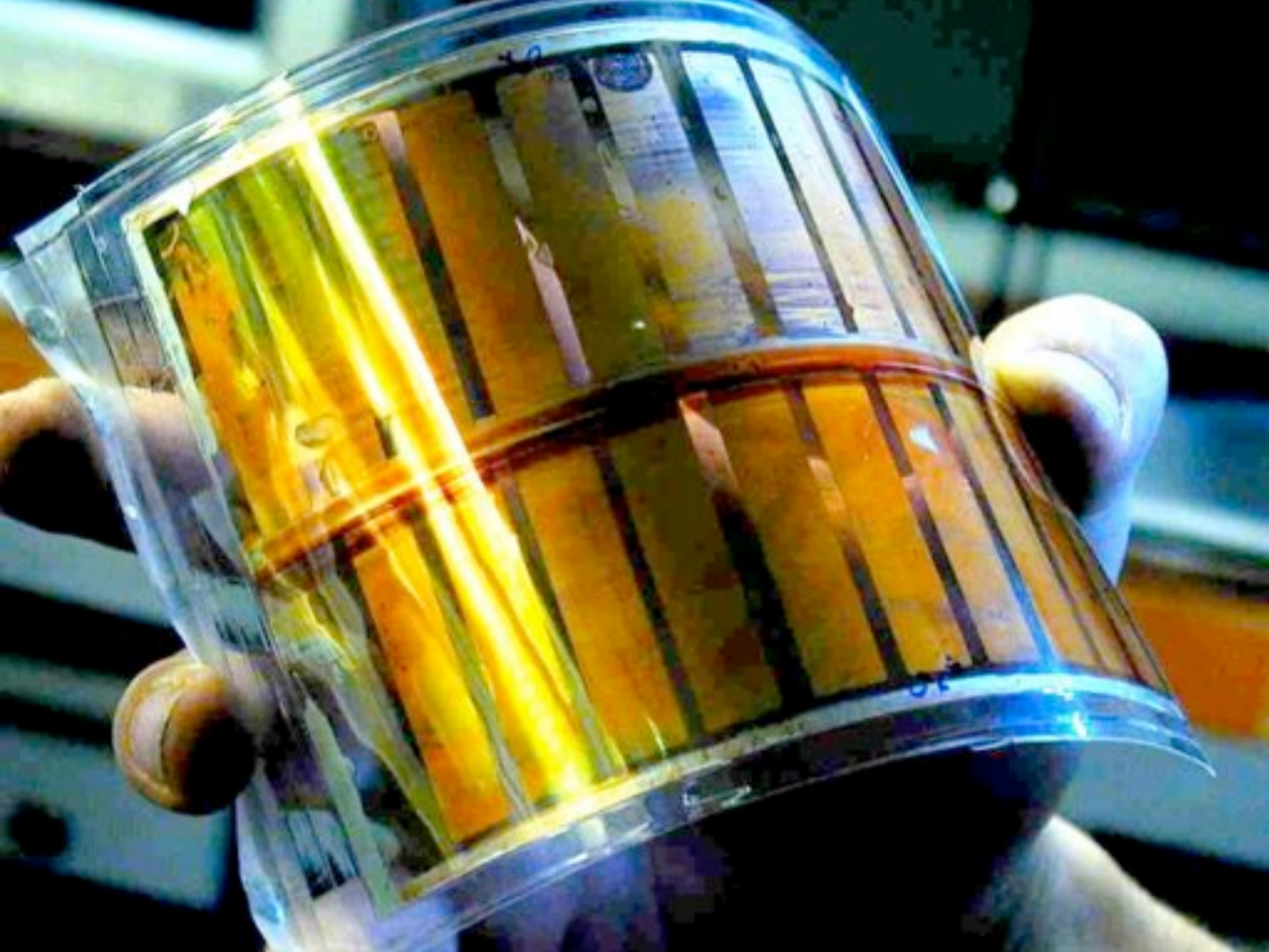
2種類の高分子を混ぜる 電子—正孔対の生成

効率的な電荷の分離



電荷（電子、正孔）の分離

起電力の発生





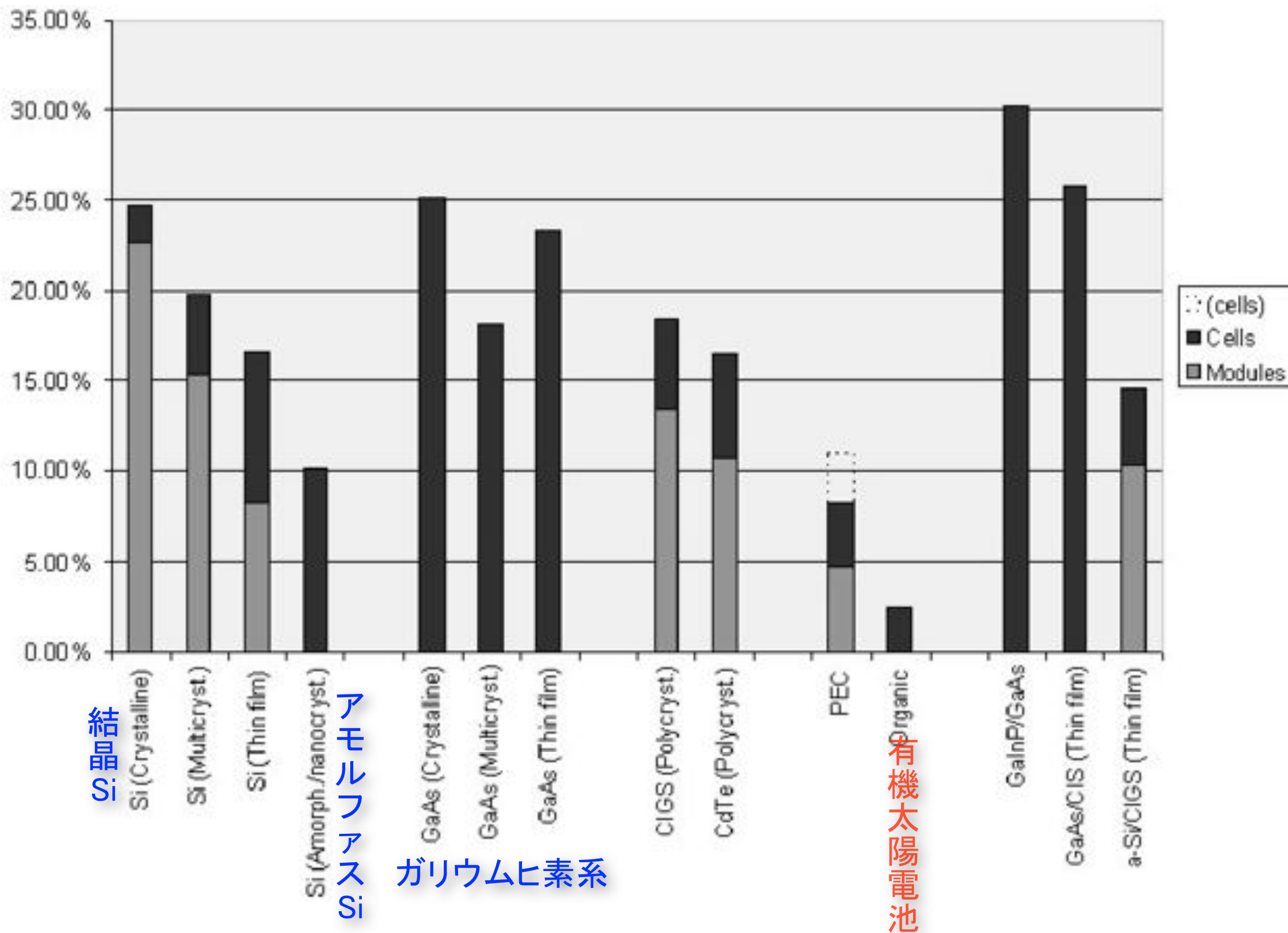
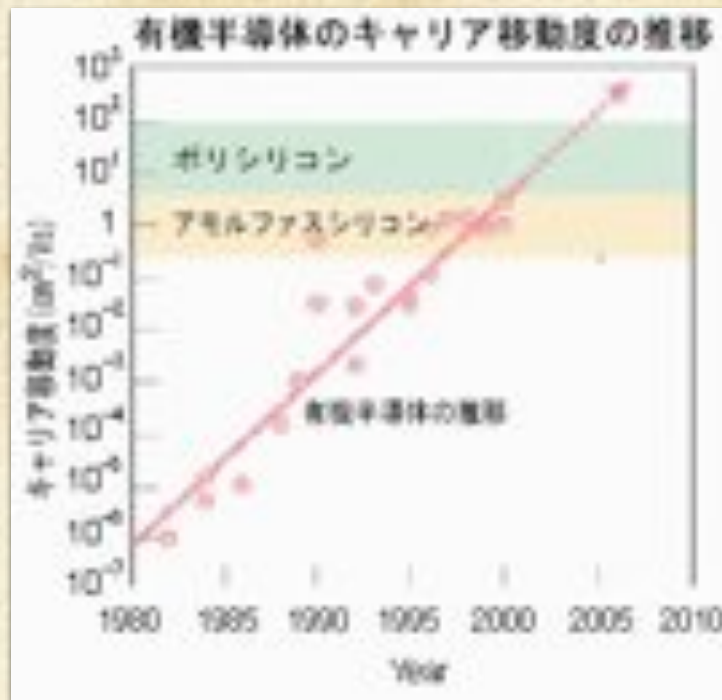


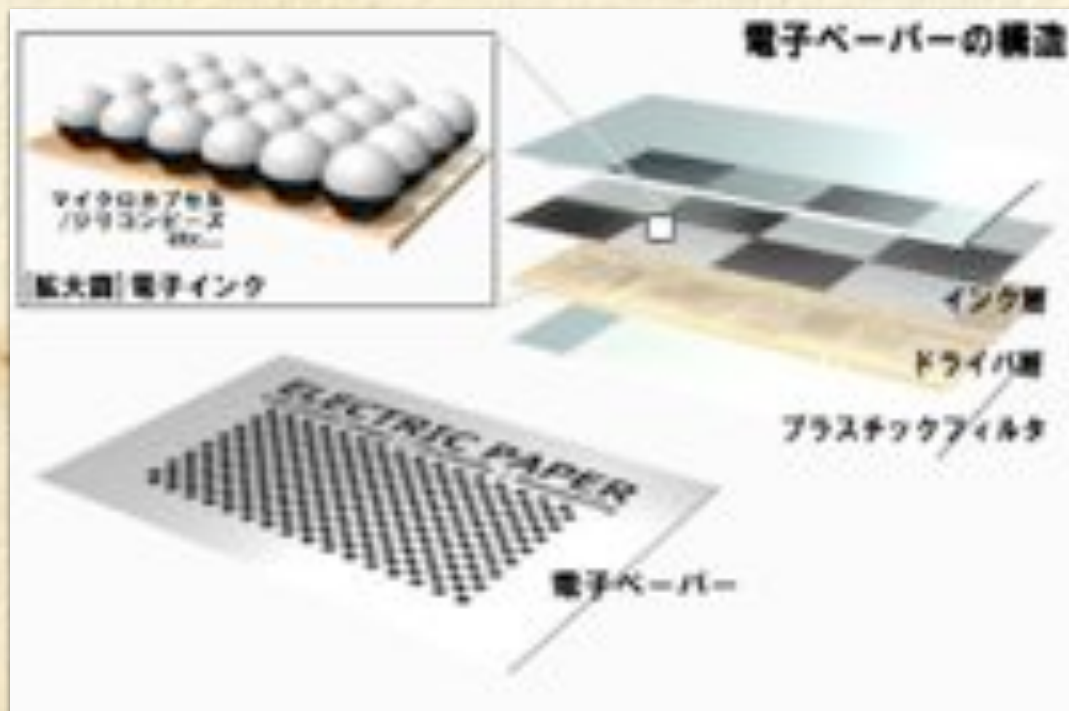
Figure 6: Record (Jan. 2003) conversion efficiencies for different PV technologies (data from [9]).

導電性高分子の未来



有機トランジスタ
電子ペーパー
RFIDタグ

プリンタブルの特徴を活かす



講義に関するコメント等

<http://spinman.phys.se.tmu.ac.jp/lecture/>

ミラーサイト：

<http://kem3.com/esrp/lecture/>

メールアドレス：

mizoguchi@phys.se.tmu.ac.jp

kem@kem3.com

「講義レポート」について

講義内容の感想文

皆さんのこれまでの人生で得て来た知識を総動員して、講義内容の自分なりの理解・考え方をまとめる

A4用紙 1頁 程度（表紙は不要）

提出：次回講義の終了時