



Energia dal sole: scenario globale, celle solari di nuova generazione e integrazione nella rete

Roberto Menozzi

Università degli Studi di Parma
Dipartimento di Ingegneria dell'informazione

Liceo Ariosto-Spallanzani – Reggio Emilia, 16 aprile 2016

Parte I:

**in cui si presenta il
problema**

Energia dal sole

Liceo Ariosto-Spallanzani – Reggio Emilia, 16 aprile 2016

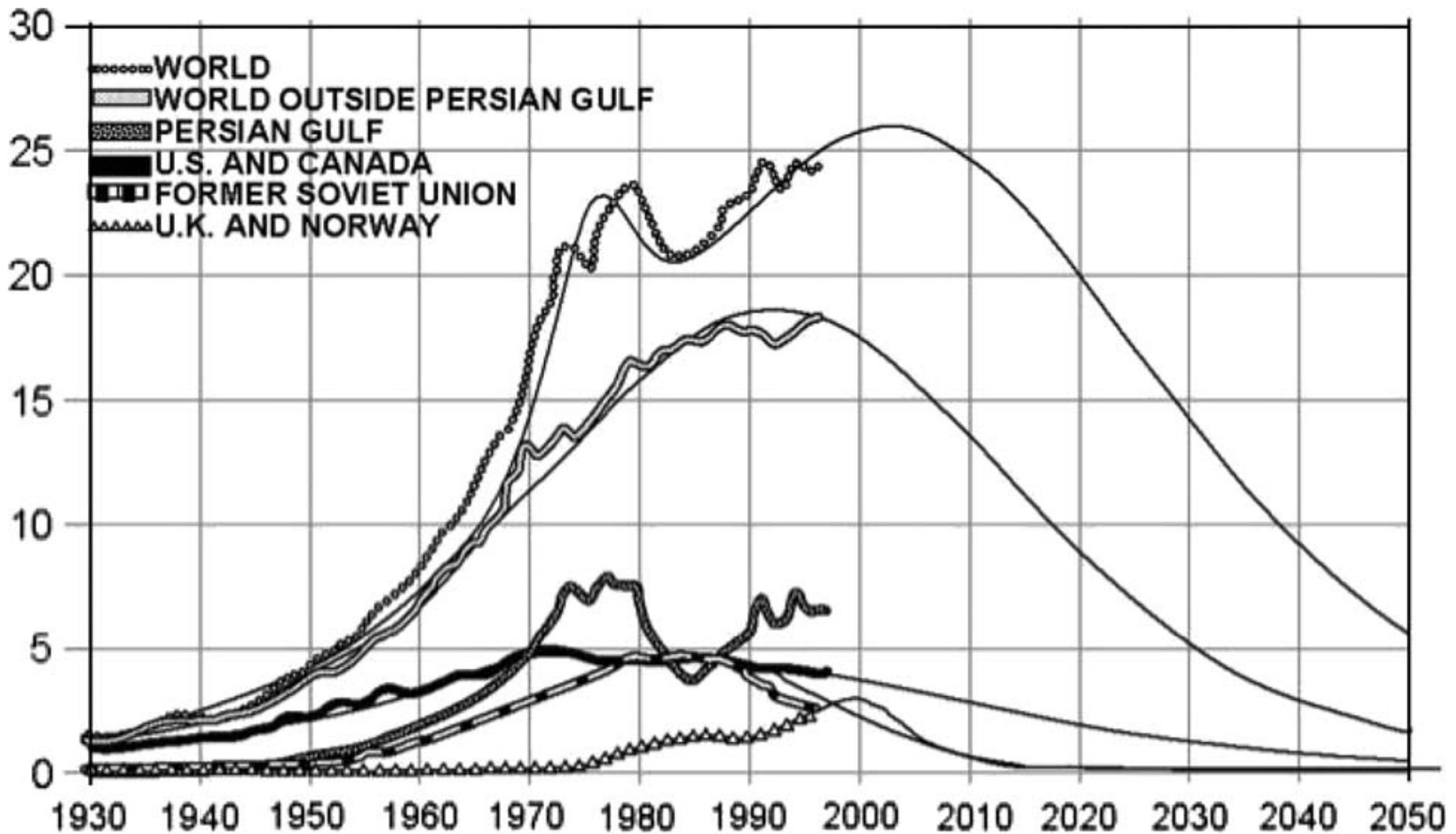
Power: units and scales

Units	Scale	Item	Consumption
Watts	10^0	Flashlight	1 W
Kilowatts	10^3	Electric kettle	1 kW
Megawatts	10^6	Google	50 MW
Gigawatts	10^9	New York	13 GW
Terawatts	10^{12}	Total photosynthesis	90 TW
Petawatts	10^{15}	Sunlight absorbed by Earth	116 PW
Exawatts	10^{18}	Output of Sun's corona	3 EW
Zetawatts	10^{21}	Illuminance of Wolf 359	125 ZW
Yottawatts	10^{24}	Tsar Bomba	5 YW
-	-	Total output of the Sun	3.6×10^{26} W
-	-	Illuminance of our galaxy	5×10^{34} W
-	-	Planck power	3.63×10^{52} W

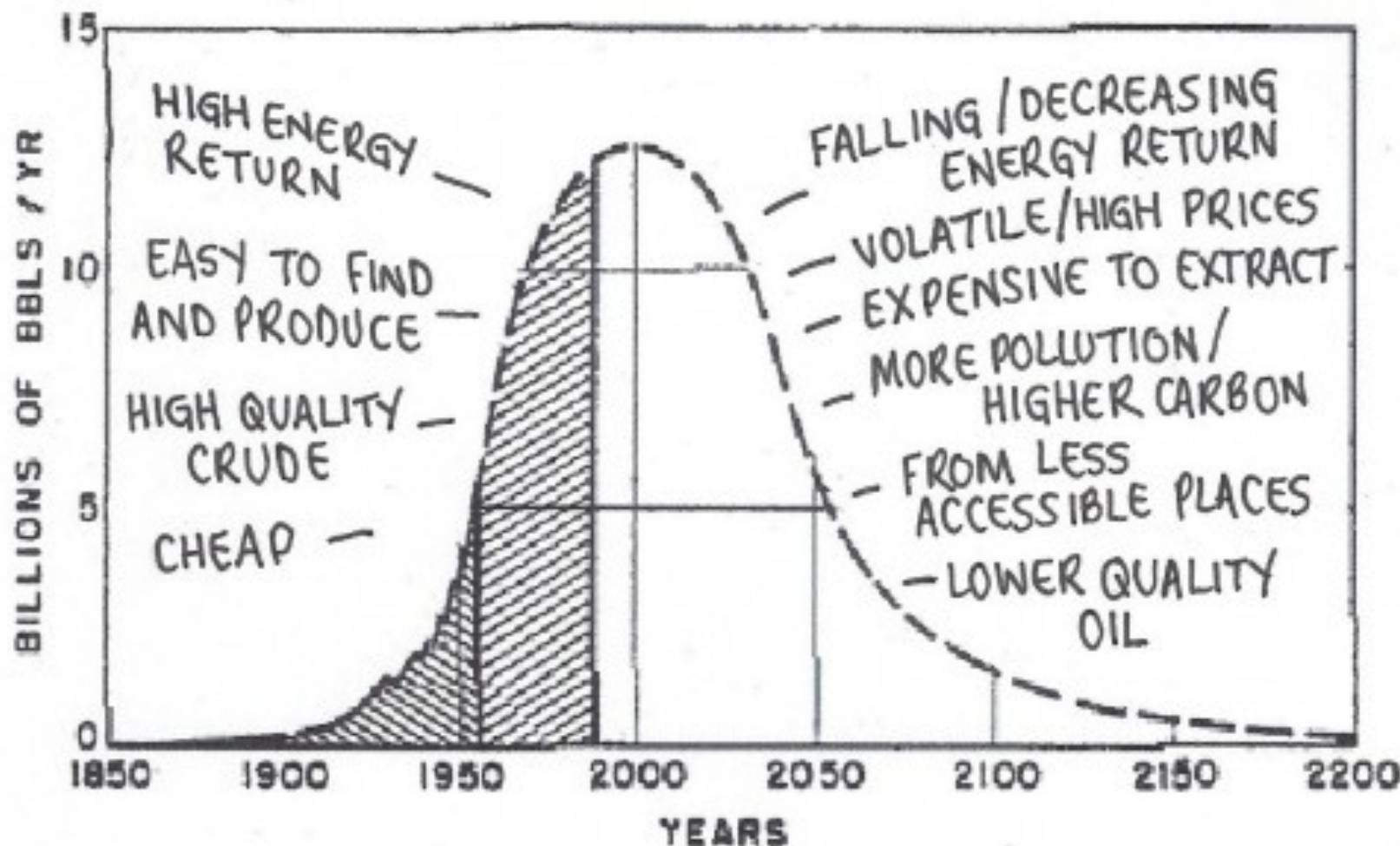
The problem



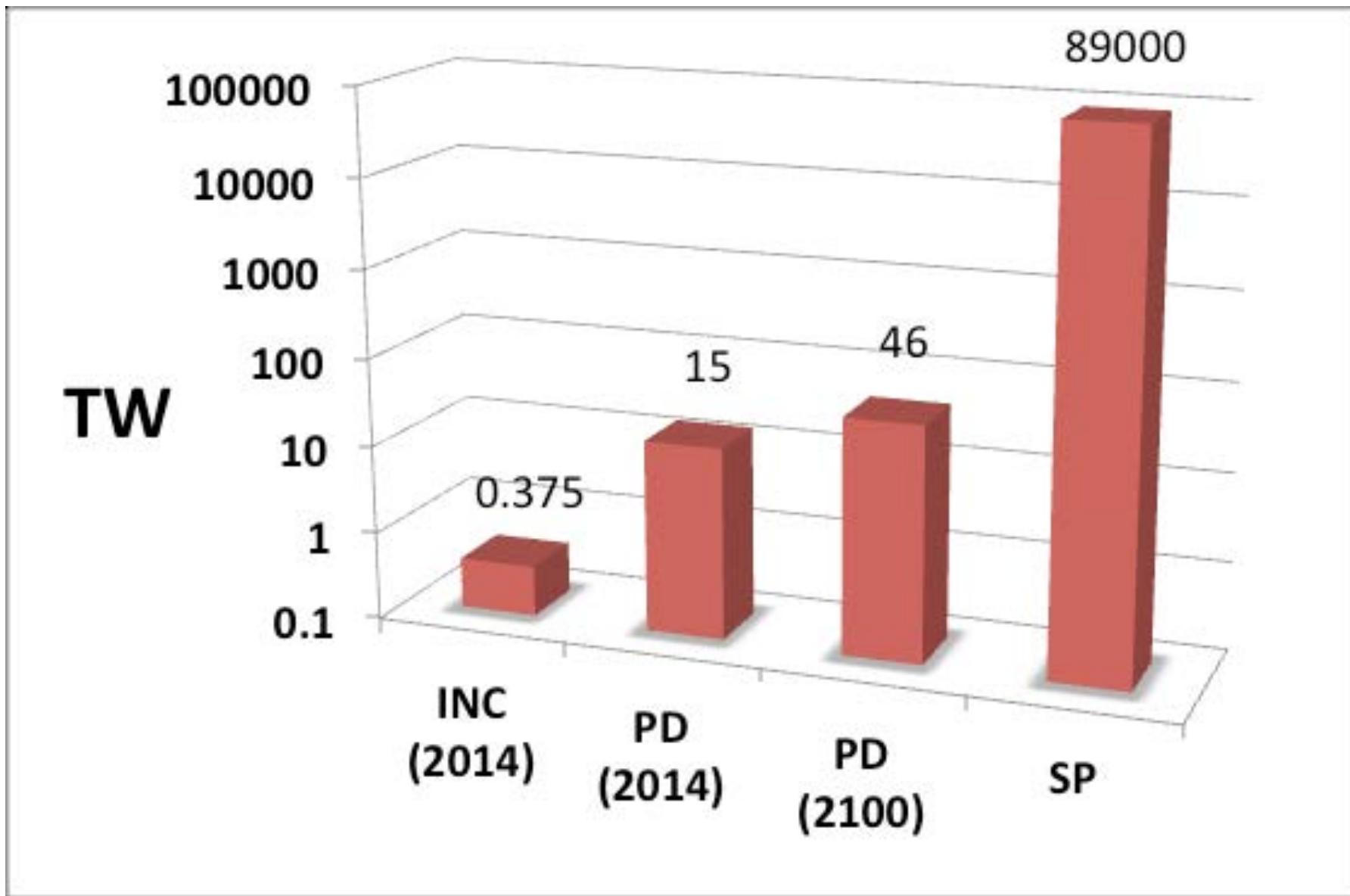
The Hubbert curve (oil)



The Hubbert curve (oil)



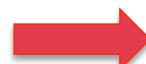
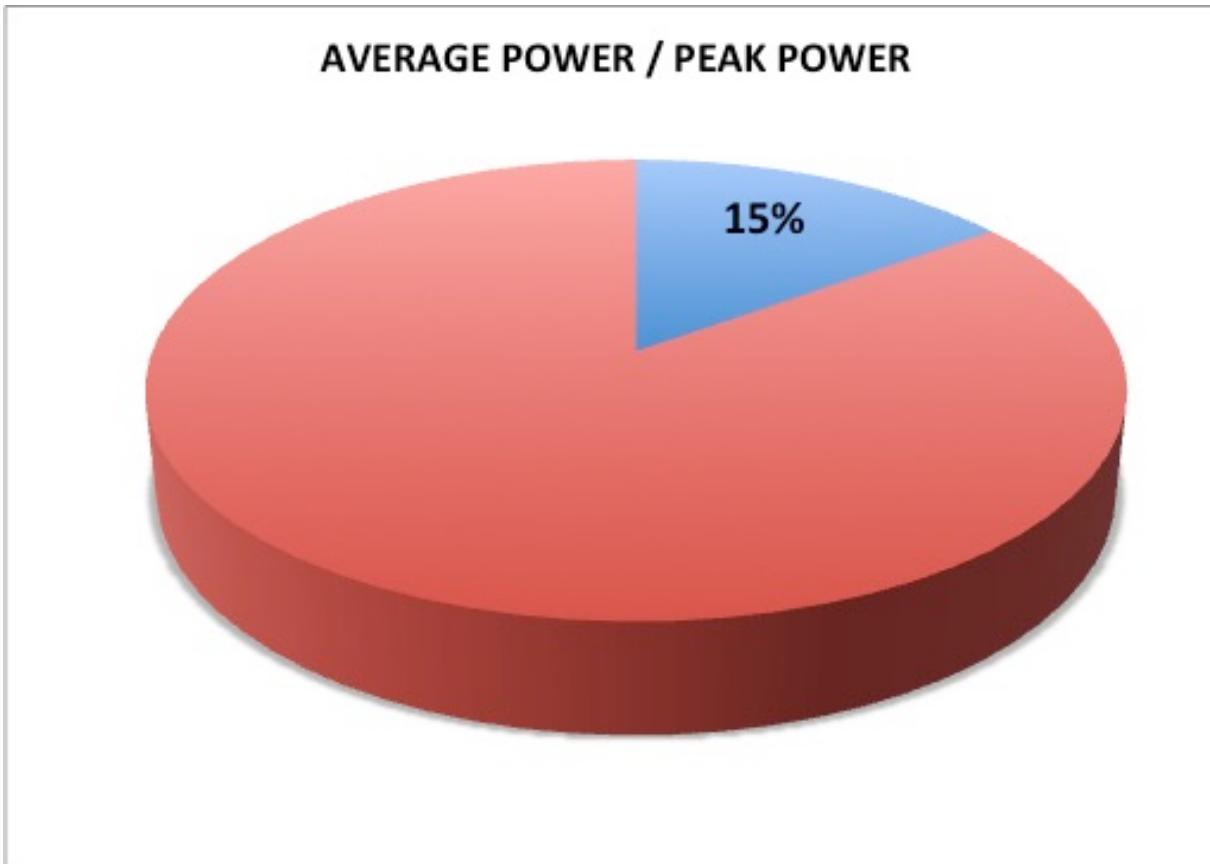
Good news



Renewable energy options

Energy source	Max. power	% of Tot. Solar
Total surface solar	85,000 TW	100%
Desert solar	7650 TW	9%
Ocean thermal	100 TW	0.12%
Wind	72 TW	0.08%
Geothermal	44 TW	0.05%
River hydroelectric	7 TW	0.008%
Biomass	7 TW	0.008%
Open ocean wave	7 TW	0.008%
Tidal wave	4 TW	0.003%
Coastal wave	3 TW	0.003%

Solar cell peak vs. average power



Tens of TW^{PEAK} needed to cover significant share of energy demand

Solar power generation scalability

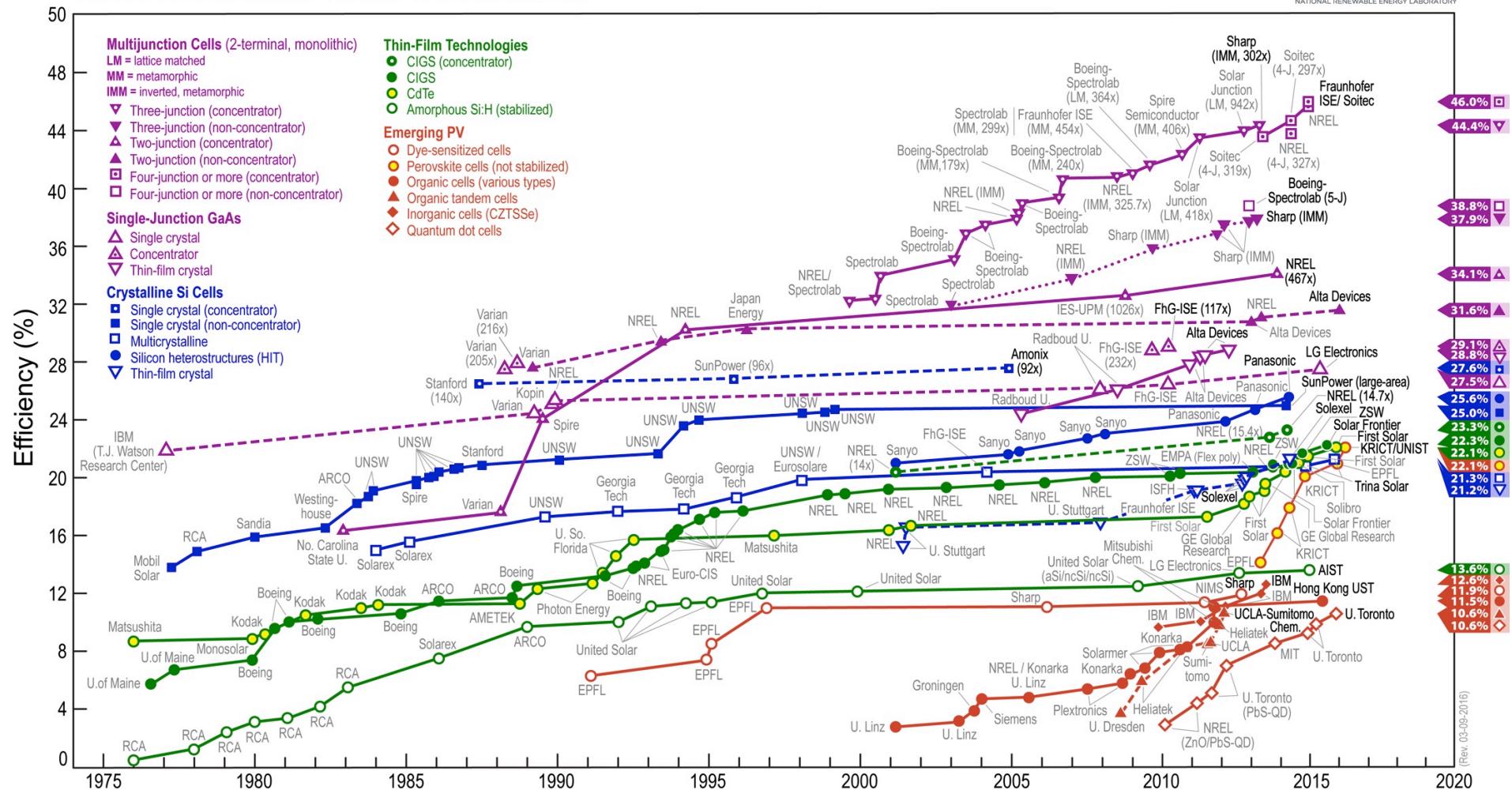
How much can any single technology contribute?

Technology	η	Limiting material	Reserve Base (ton)	AP^{PEAK} (GW)	Average power (GW)	% of 2100 PD
CdTe	10.6	Tellurium	48 000	816	120-160	0.4
CIGS	11.5	Indium	16 000	650	100-130	0.3
Dye-sensitized	7	Ruthenium	5 000	890	135-180	0.4
C-Si	15	Silver	400 000	5700	860-1150	2.5

The efficiency Gold Rush



Best Research-Cell Efficiencies



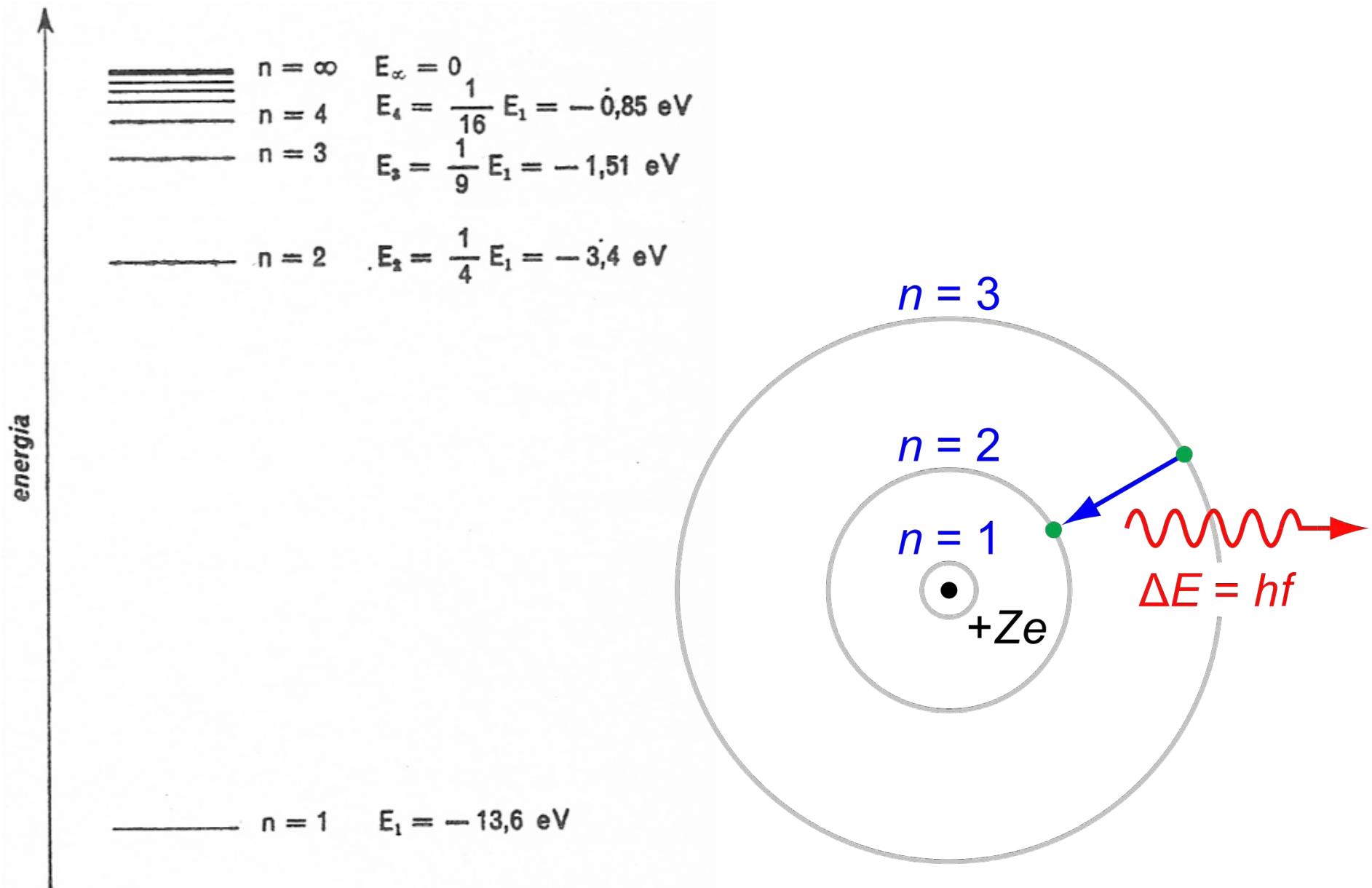
Parte II:

**in cui si tenta di spiegare
cosa sia un
semiconduttore
e cosa sia un diodo p-n**

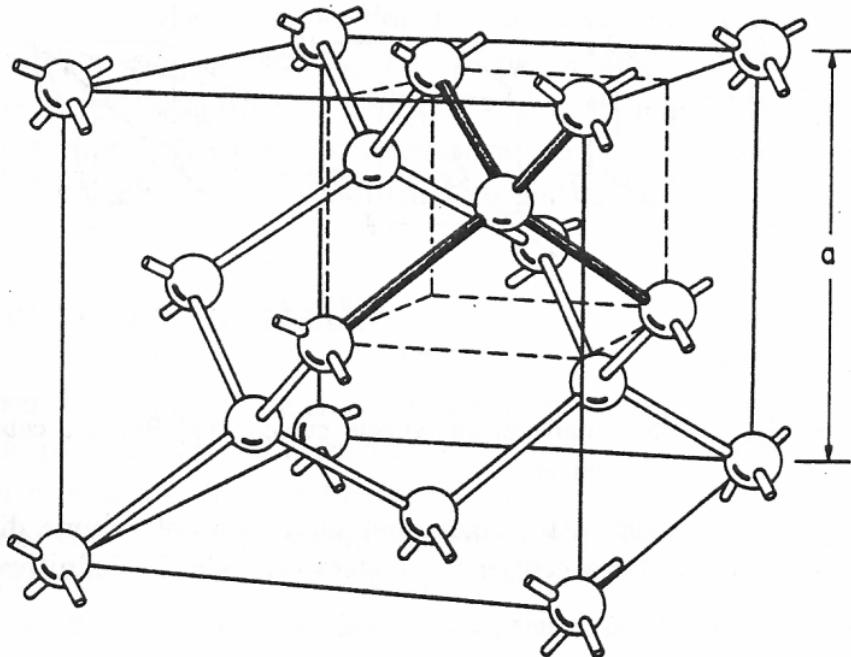
Energia dal sole

Liceo Ariosto-Spallanzani – Reggio Emilia, 16 aprile 2016

Niels Bohr's atom (1913)

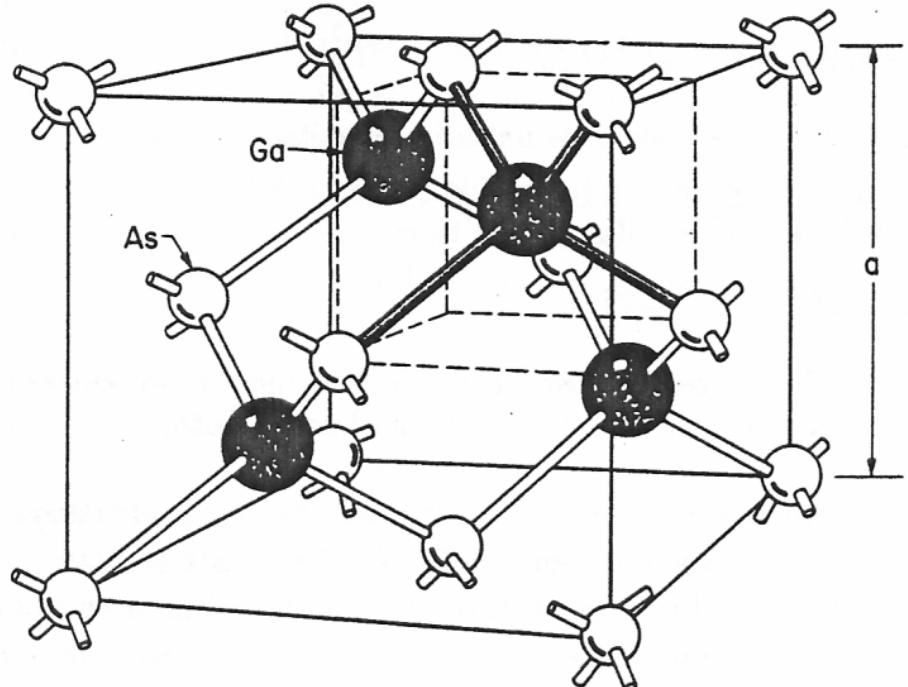


Crystal structures

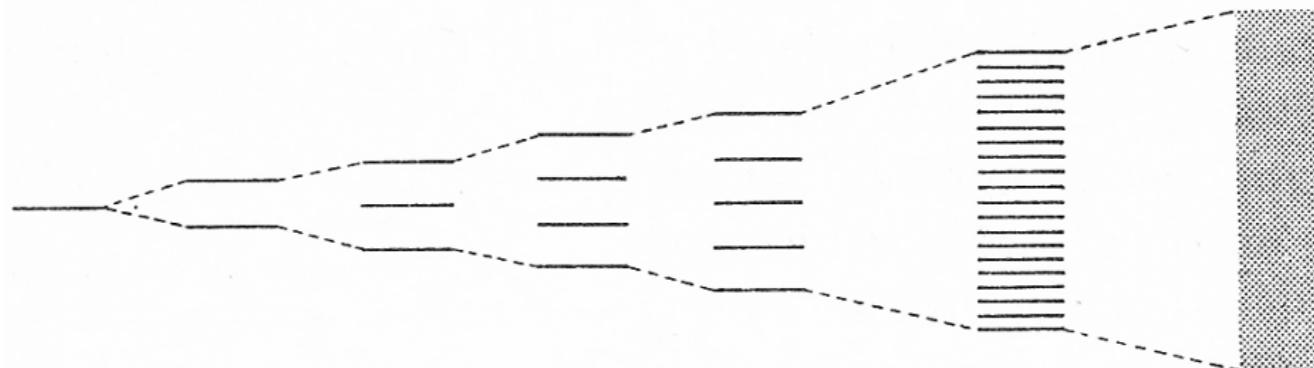


diamond (Si)

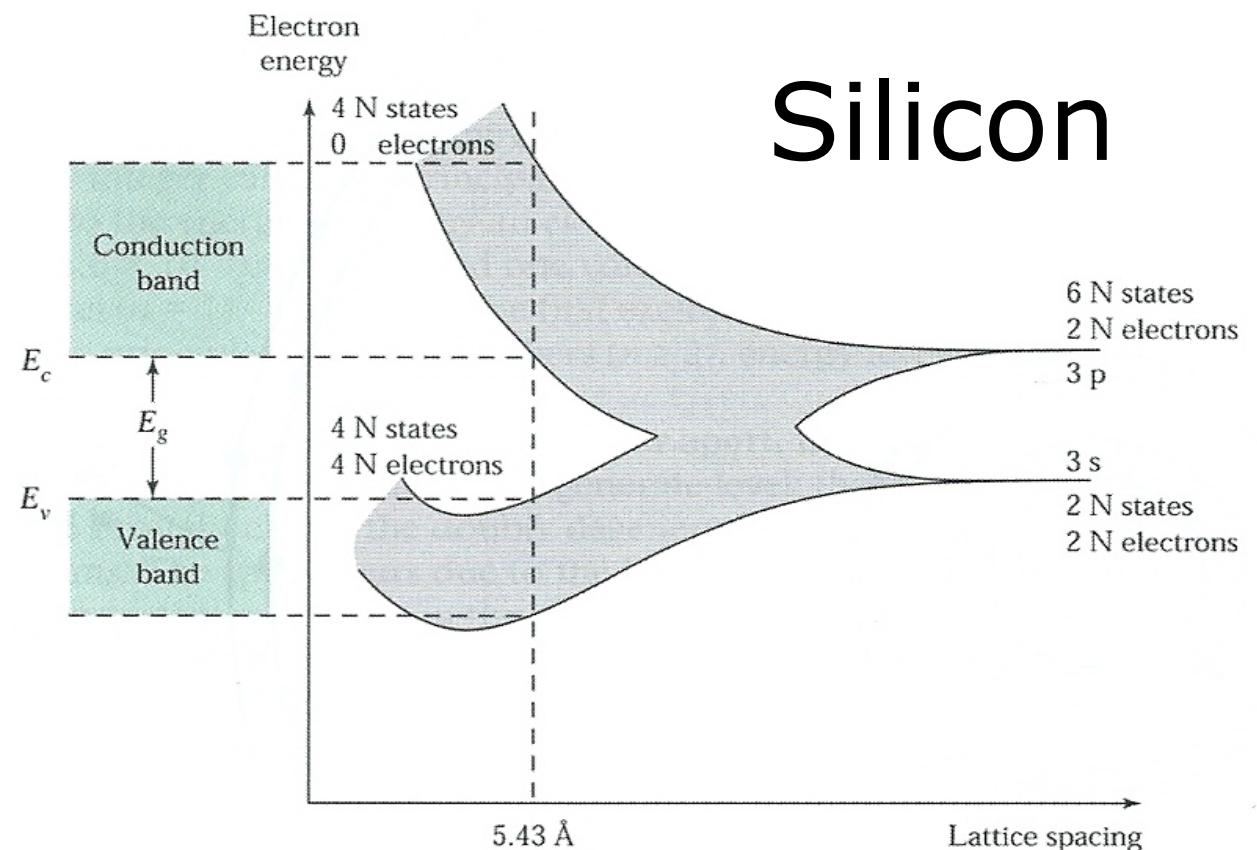
zincblende (GaAs)



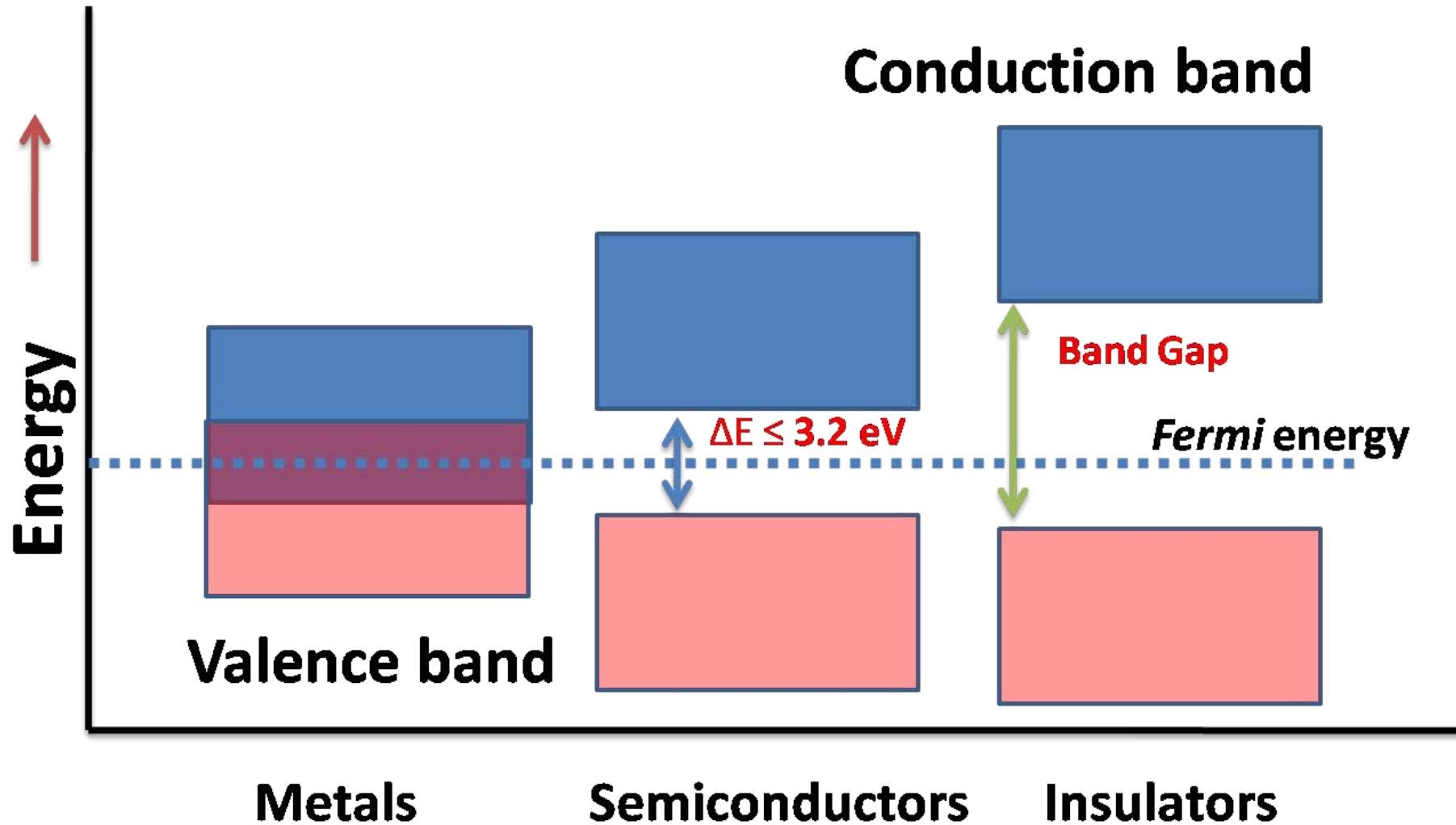
Energy bands



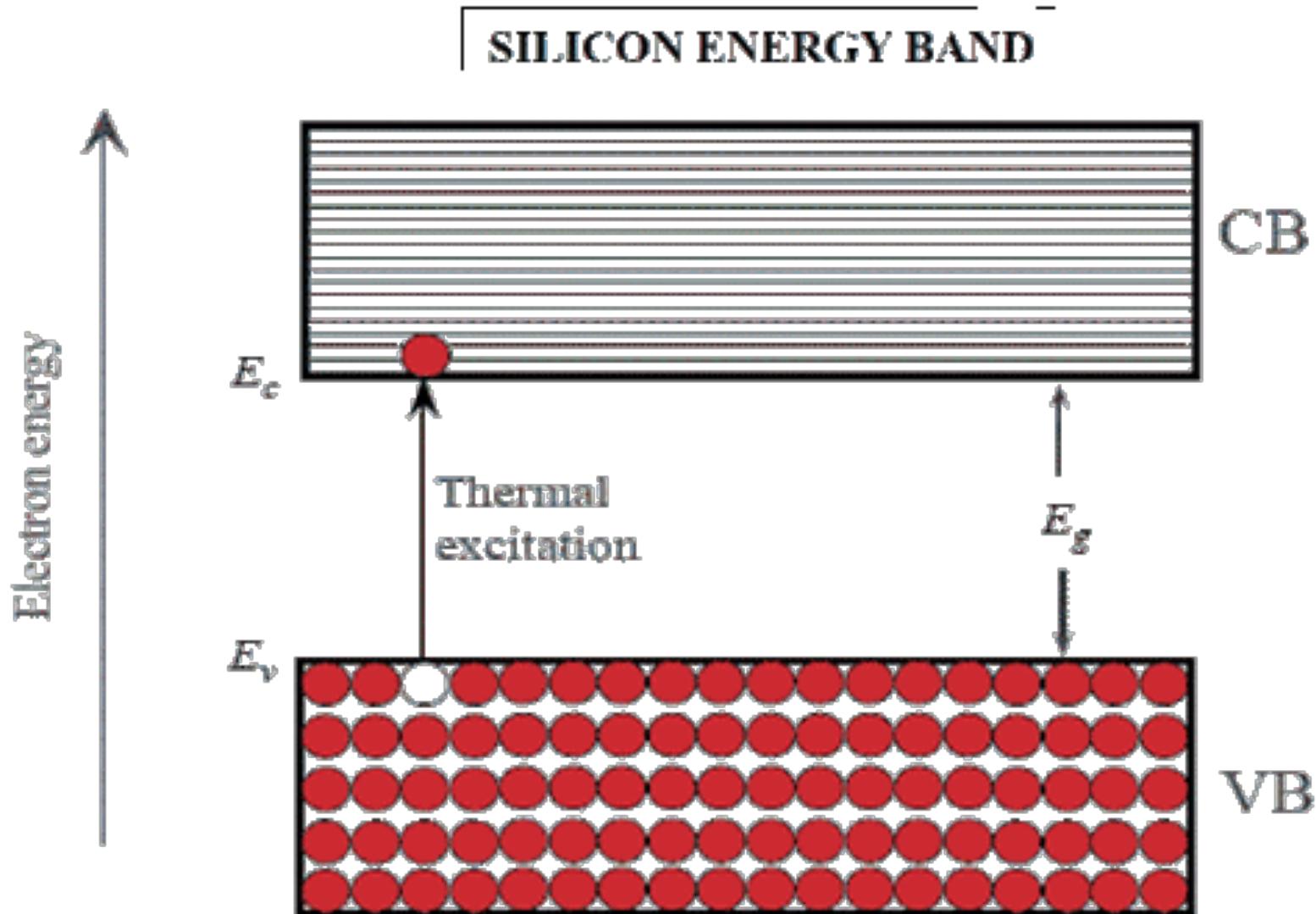
1 2 3
nun



Energy bands & material properties



Charge carriers: electrons and holes



Doping: n & p regions

Silicon has 4 valence electrons: [Ne]3s²3p²



Silicon



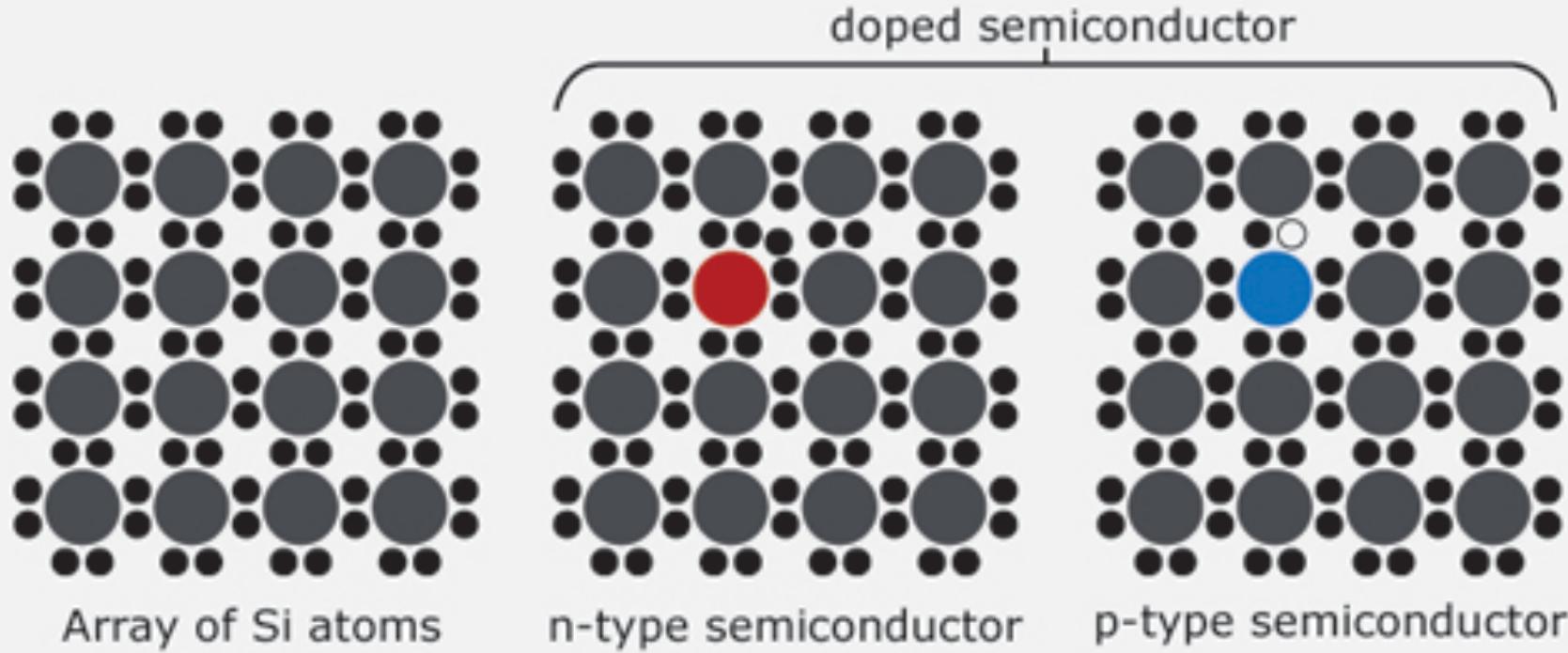
Electron



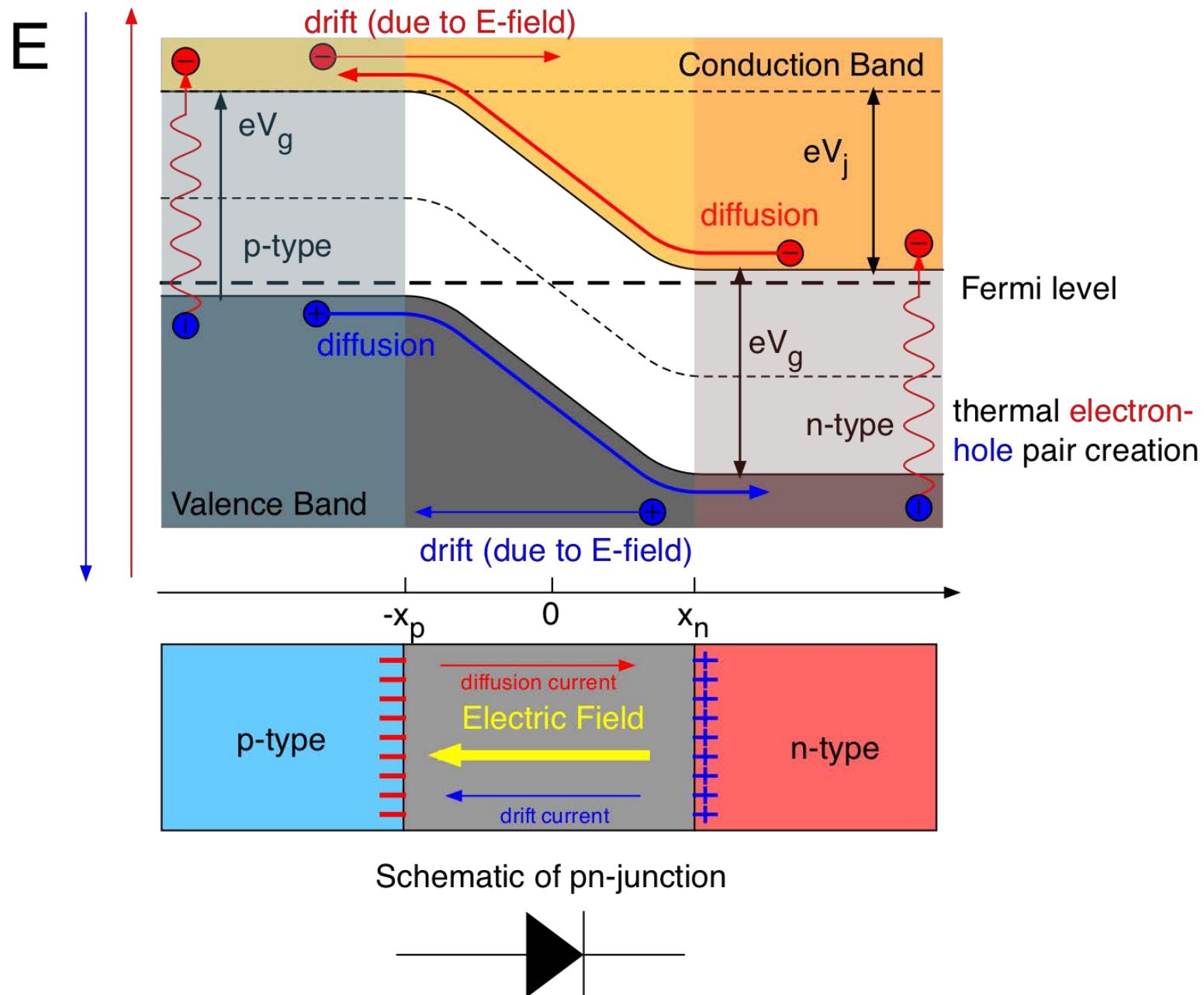
Phosphorus



Boron



The p-n junction diode



Parte III:

**in cui si parla (finalmente)
di celle solari**

Energia dal sole

Liceo Ariosto-Spallanzani – Reggio Emilia, 16 aprile 2016

Einstein's equation no. 1 (1905)

639



13. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung¹⁾ führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll.

Ich legte dort die Maxwell-Hertzschen Gleichungen für den leeren Raum nebst dem Maxwellschen Ausdruck für die elektromagnetische Energie des Raumes zugrunde und außerdem das Prinzip:

Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Parallel-Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden (Relativitätsprinzip).

Gestützt auf diese Grundlagen²⁾ leitete ich unter anderem das nachfolgende Resultat ab (loc. § 8):

Ein System von ebenen Lichtwellen besitze, auf das Koordinatensystem (x, y, z) bezogen, die Energie I ; die Strahlrichtung (Wellennormale) bilde den Winkel φ mit der x -Achse des Systems. Führt man ein neues, gegen das System (x, y, z) in gleichförmiger Paralleltranslation begriffenes Koordinatensystem (ξ, η, ζ) ein, dessen Ursprung sich mit der Geschwindigkeit v längs der x -Achse bewegt, so besitzt die genannte Lichtmenge — im System (ξ, η, ζ) gemessen — die Energie:

$$I^* = I \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}},$$

wobei V die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Von diesem Resultat machen wir im folgenden Gebrauch.

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17. p. 891. 1905.

2) Das dort benutzte Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist natürlich in den Maxwellschen Gleichungen enthalten.

Einstein's equation no. 2 (1905)

182

6. Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betrreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.

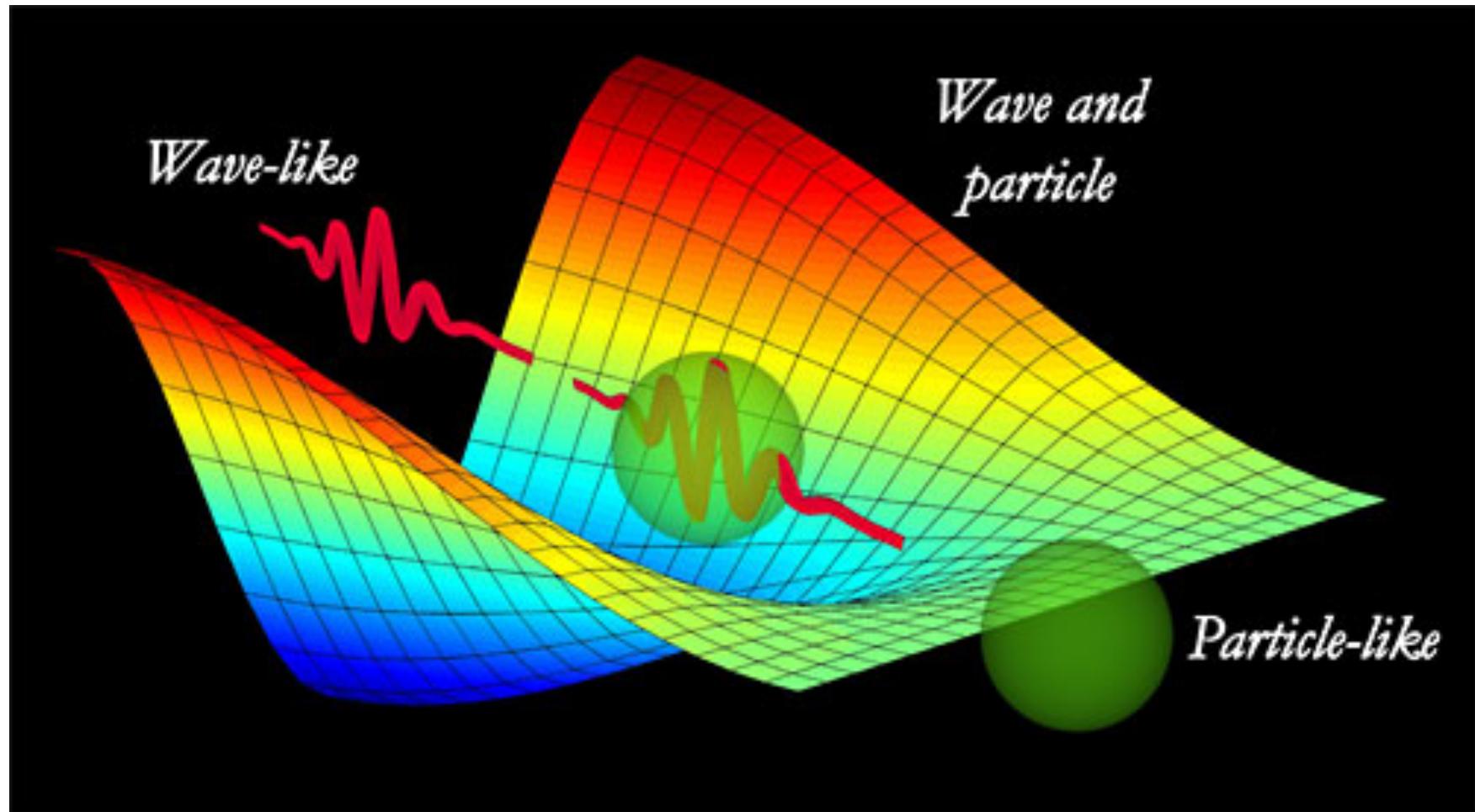
Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen in elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwellschen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das

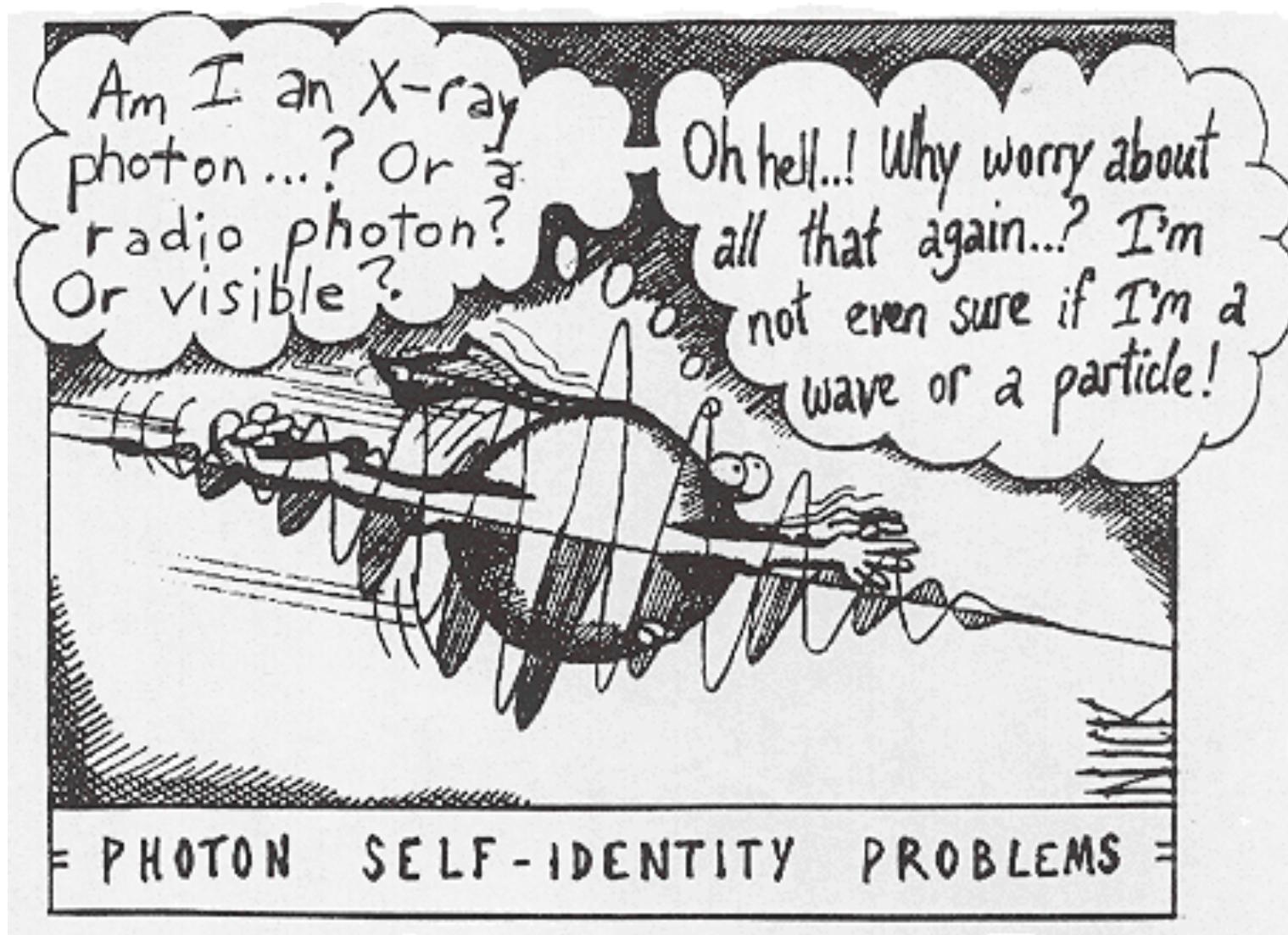
$$E = h f$$



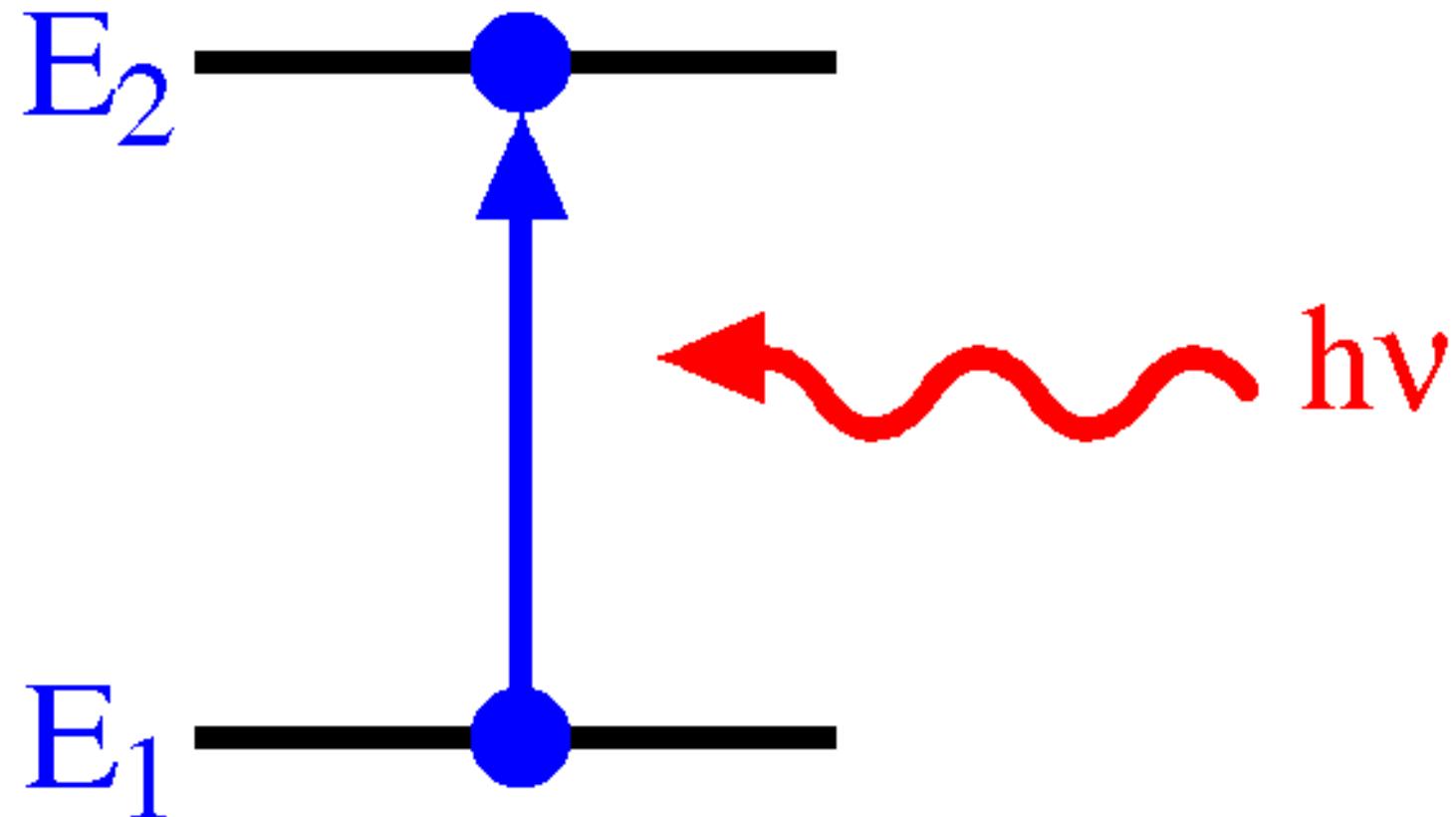
The wave-particle duality of light



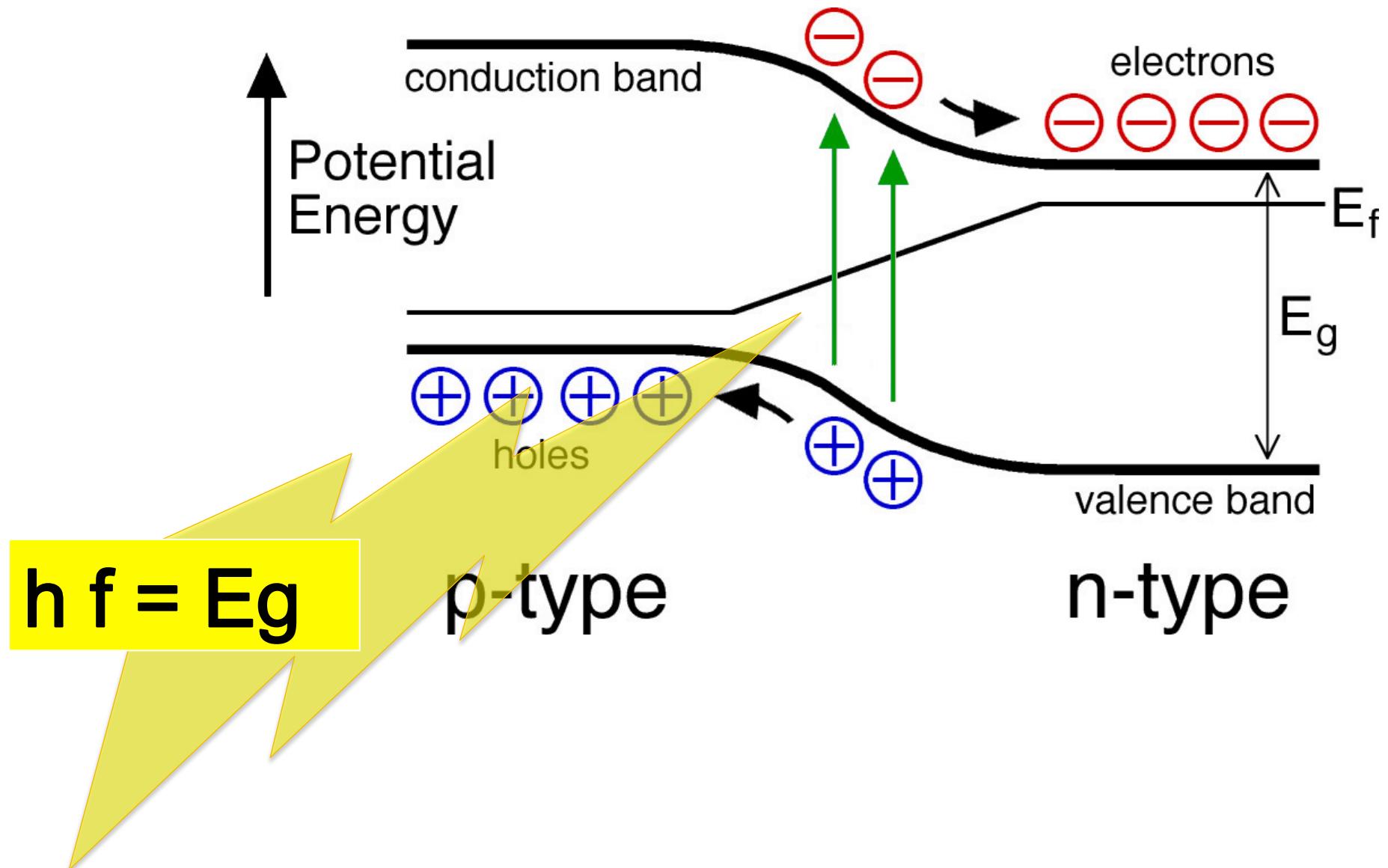
The wave-particle duality of light



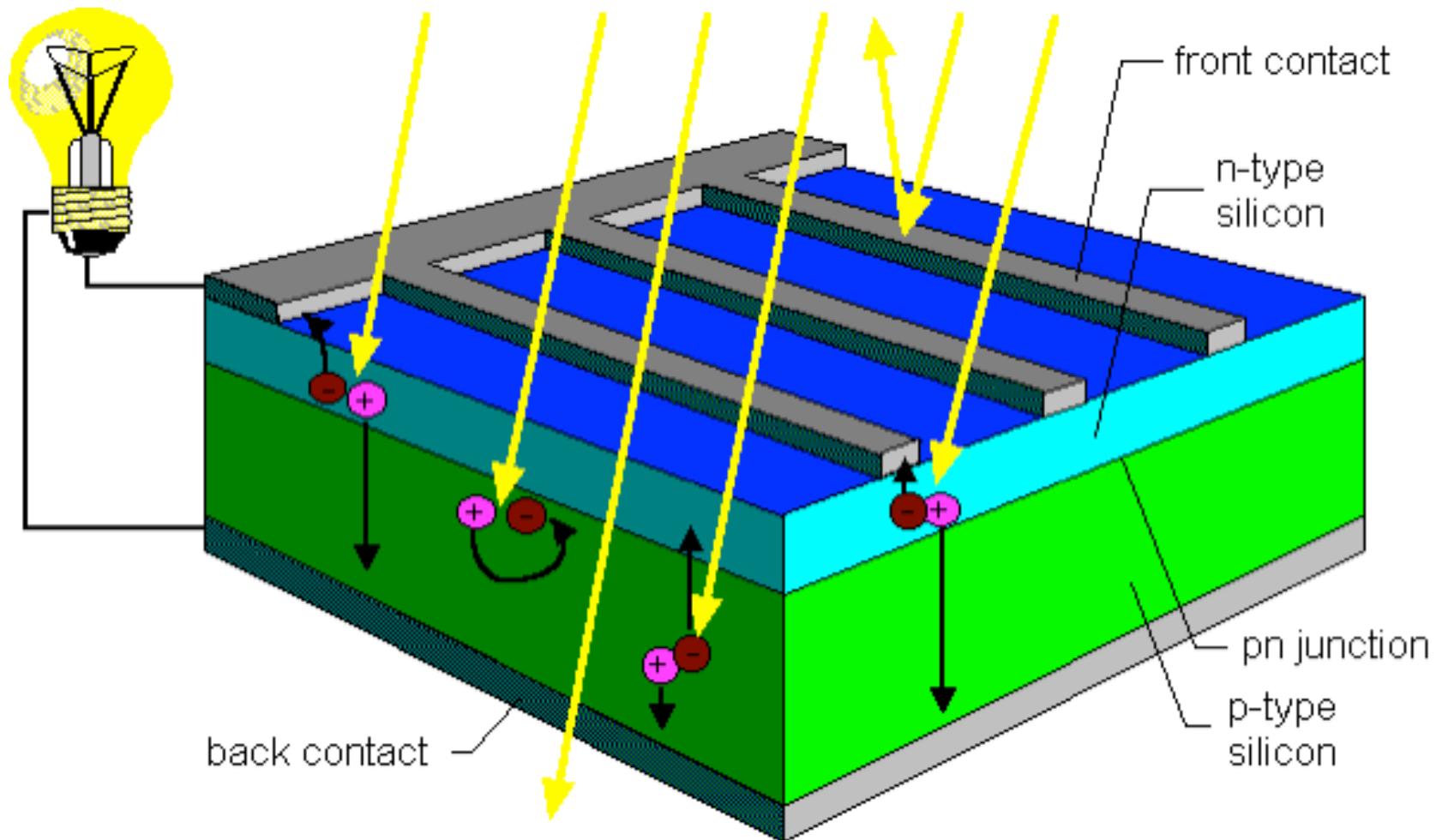
Photon absorption



Photon absorption in a diode



The photovoltaic effect



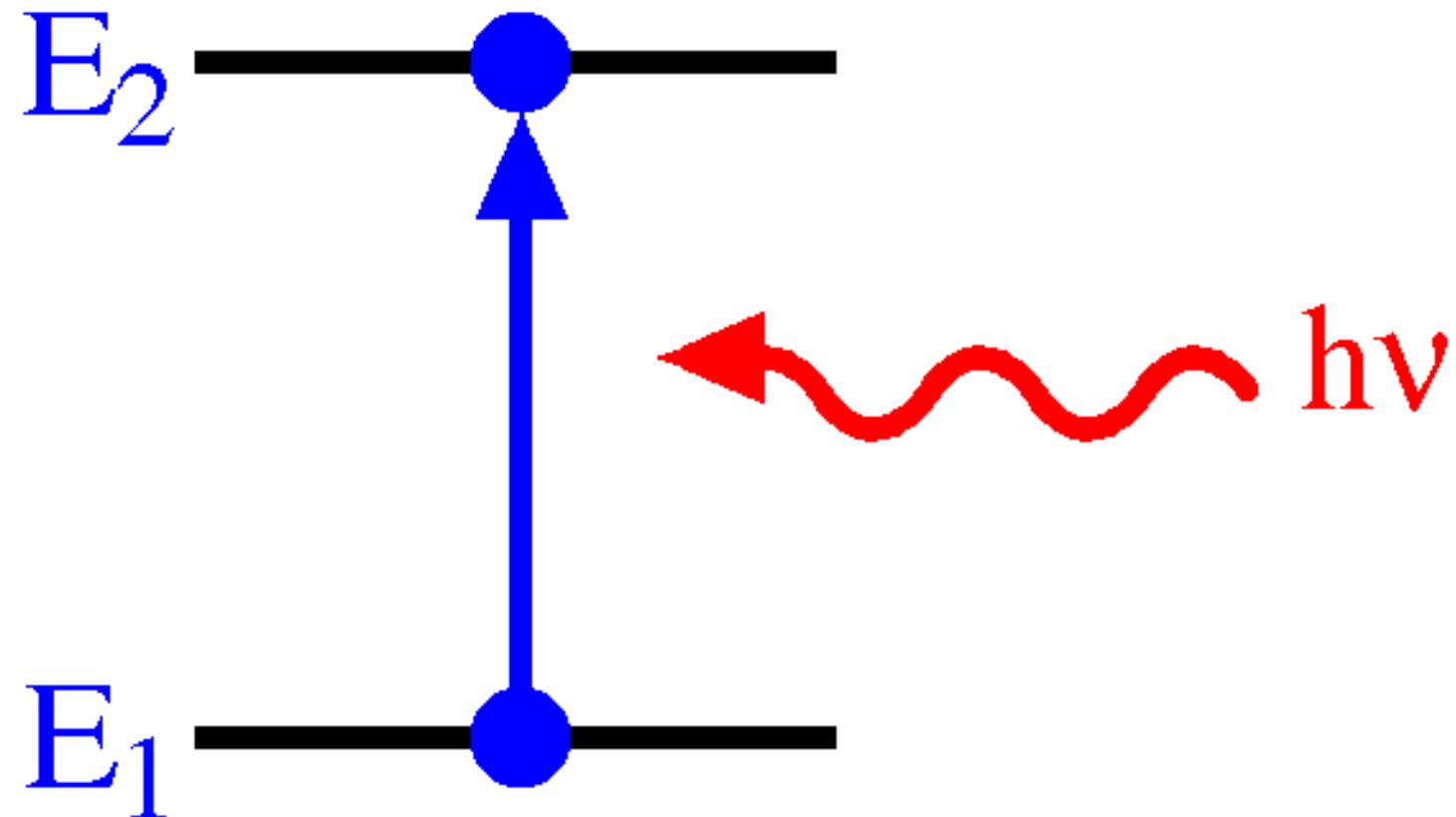
Parte IV:

**in cui si confrontano
diverse tecnologie
di celle solari**

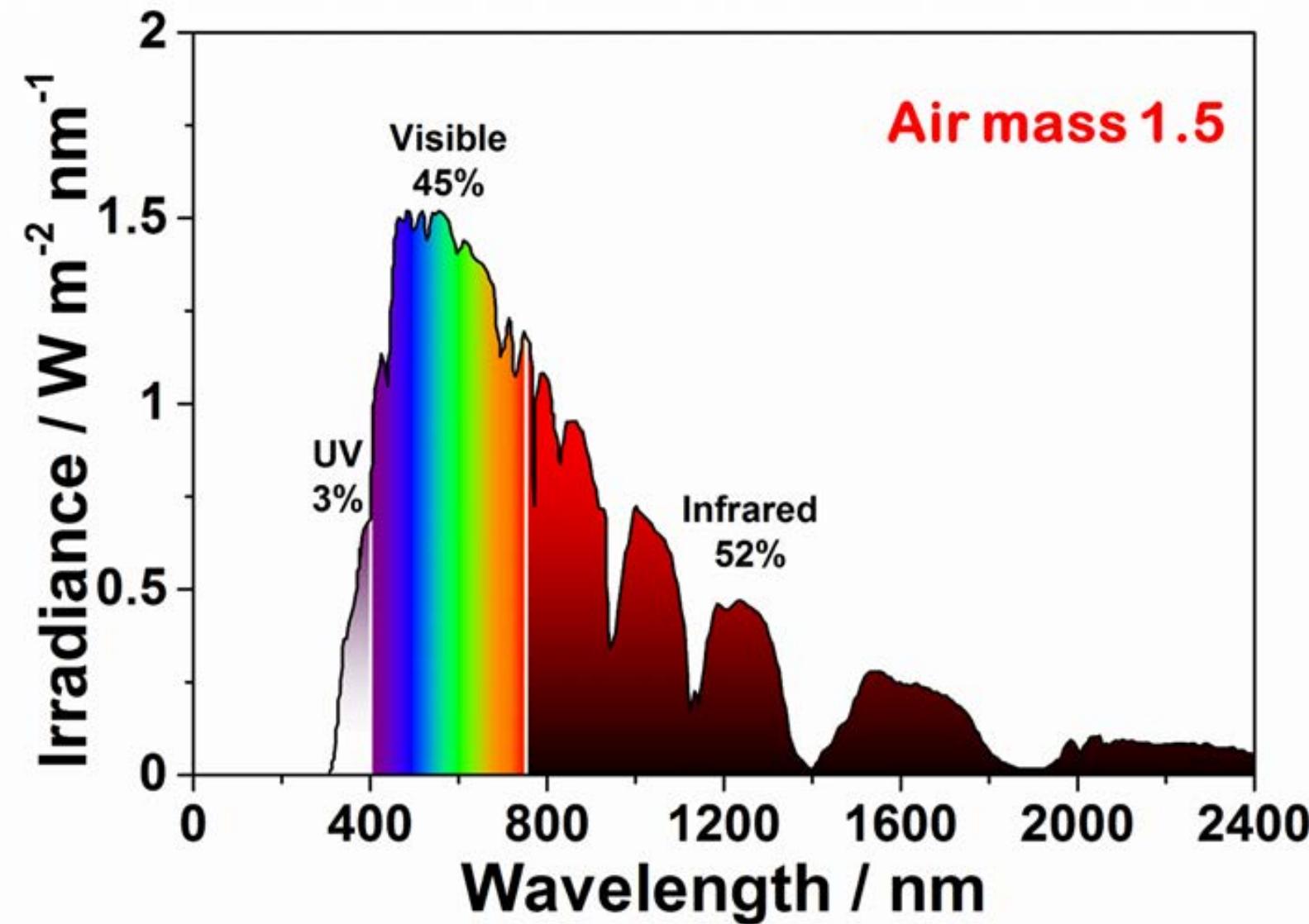
Energia dal sole

Liceo Ariosto-Spallanzani – Reggio Emilia, 16 aprile 2016

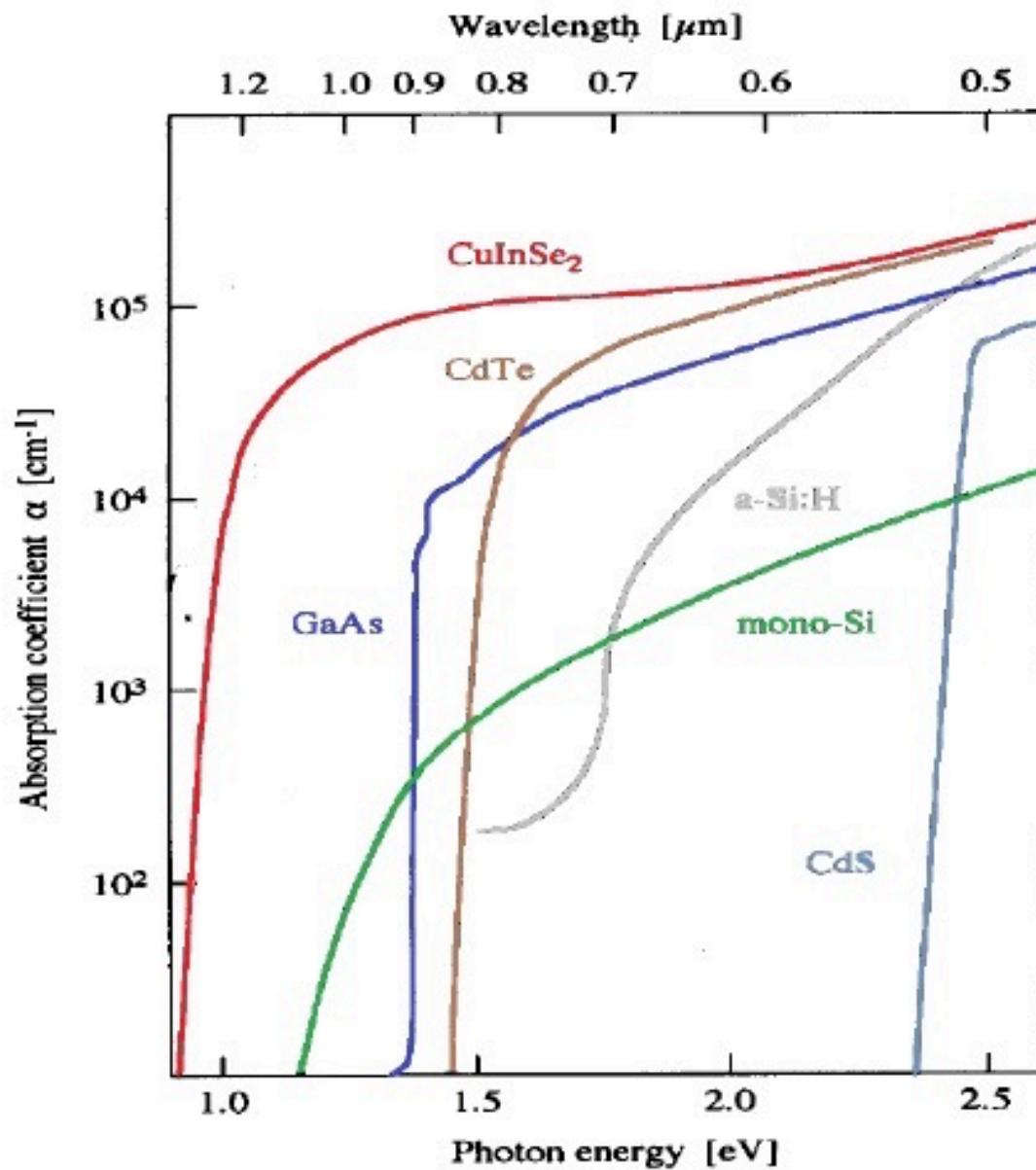
Photon absorption



The solar spectrum

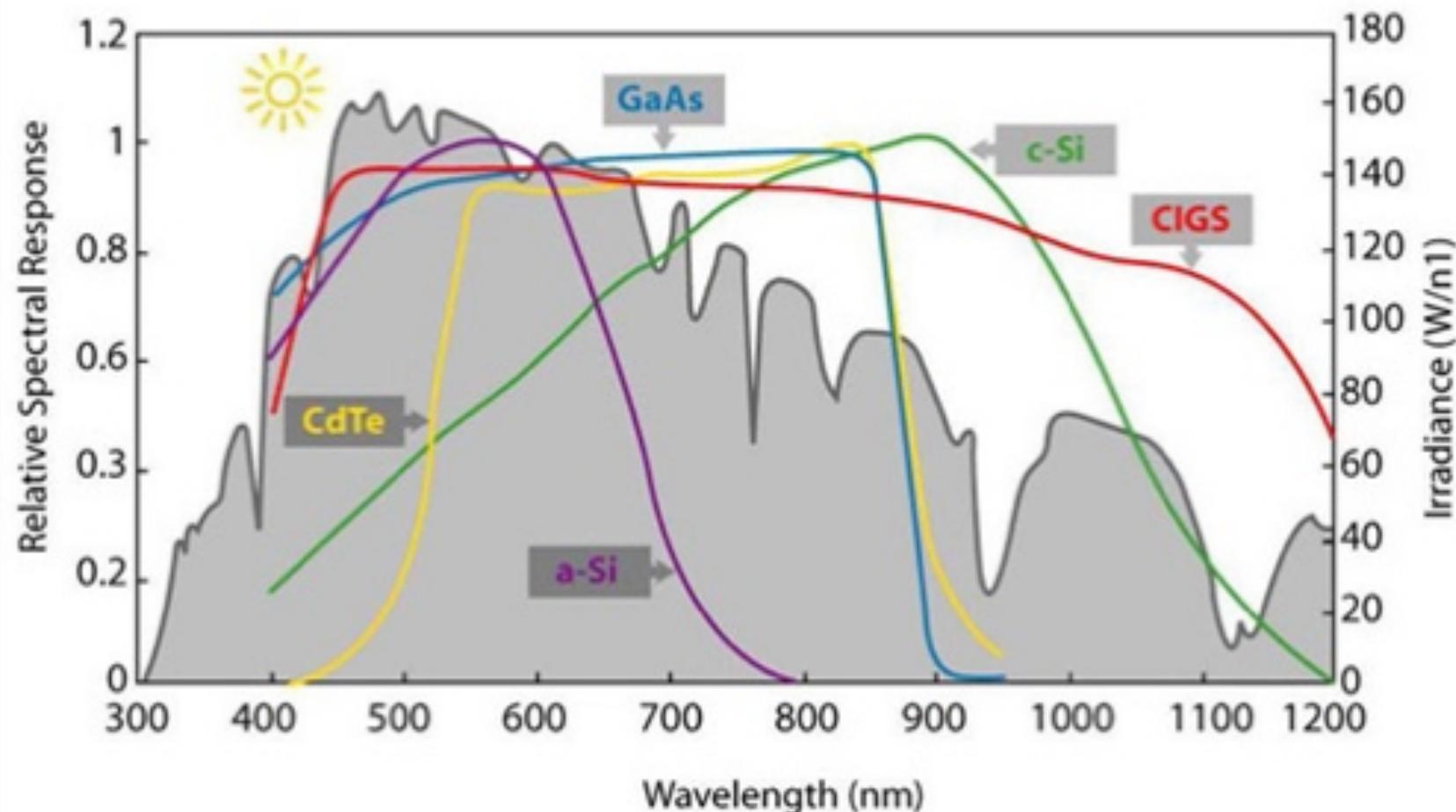


The right stuff

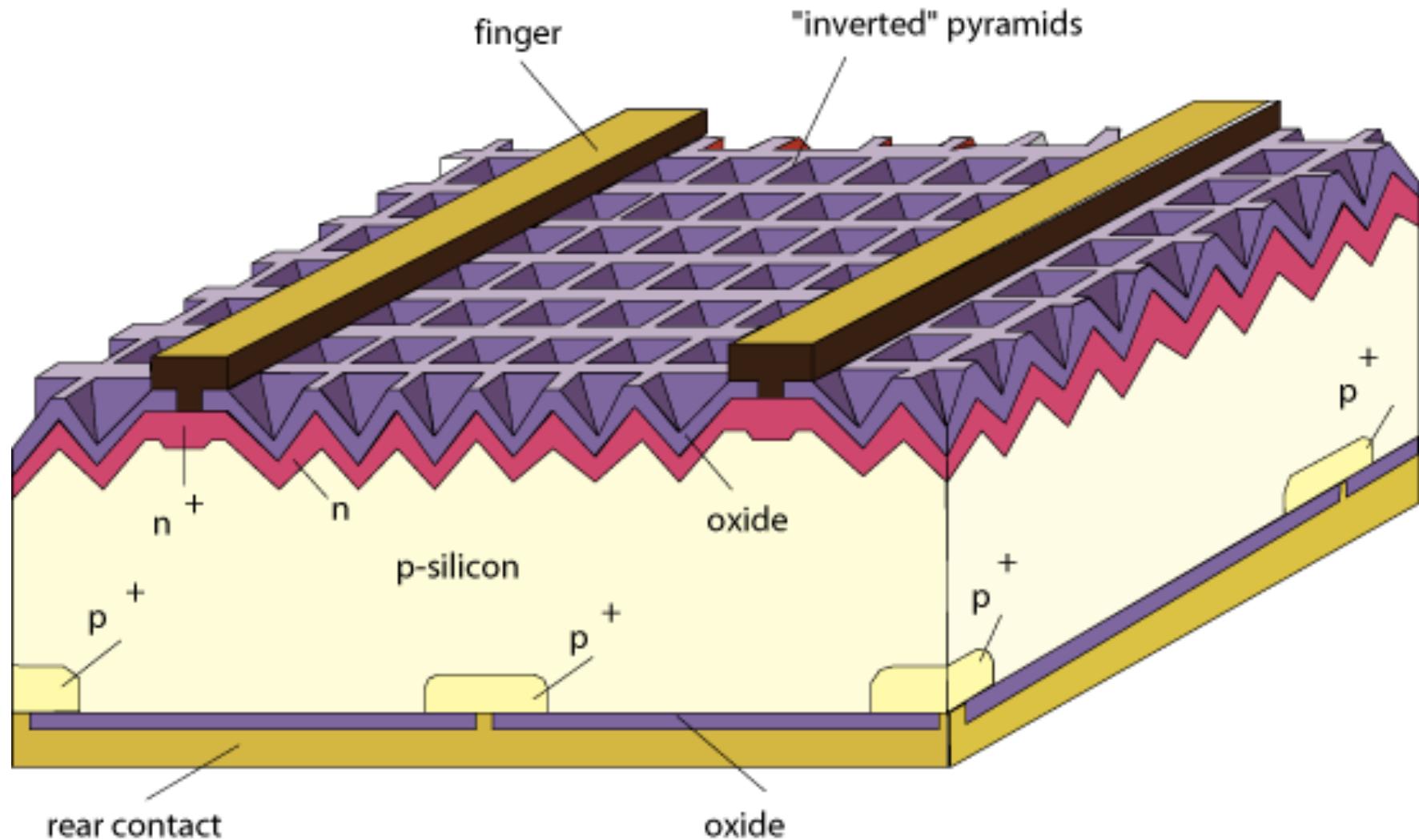


The right stuff

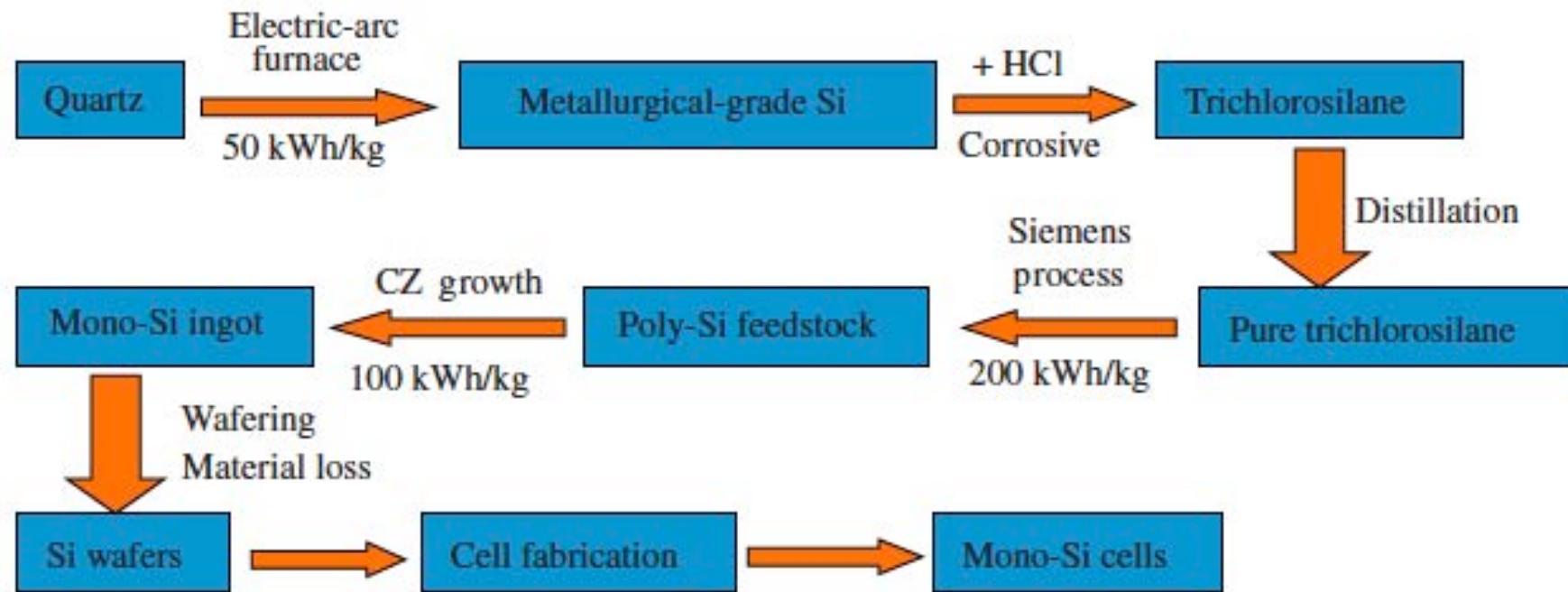
Spectral Response Characteristics of Solar Cell



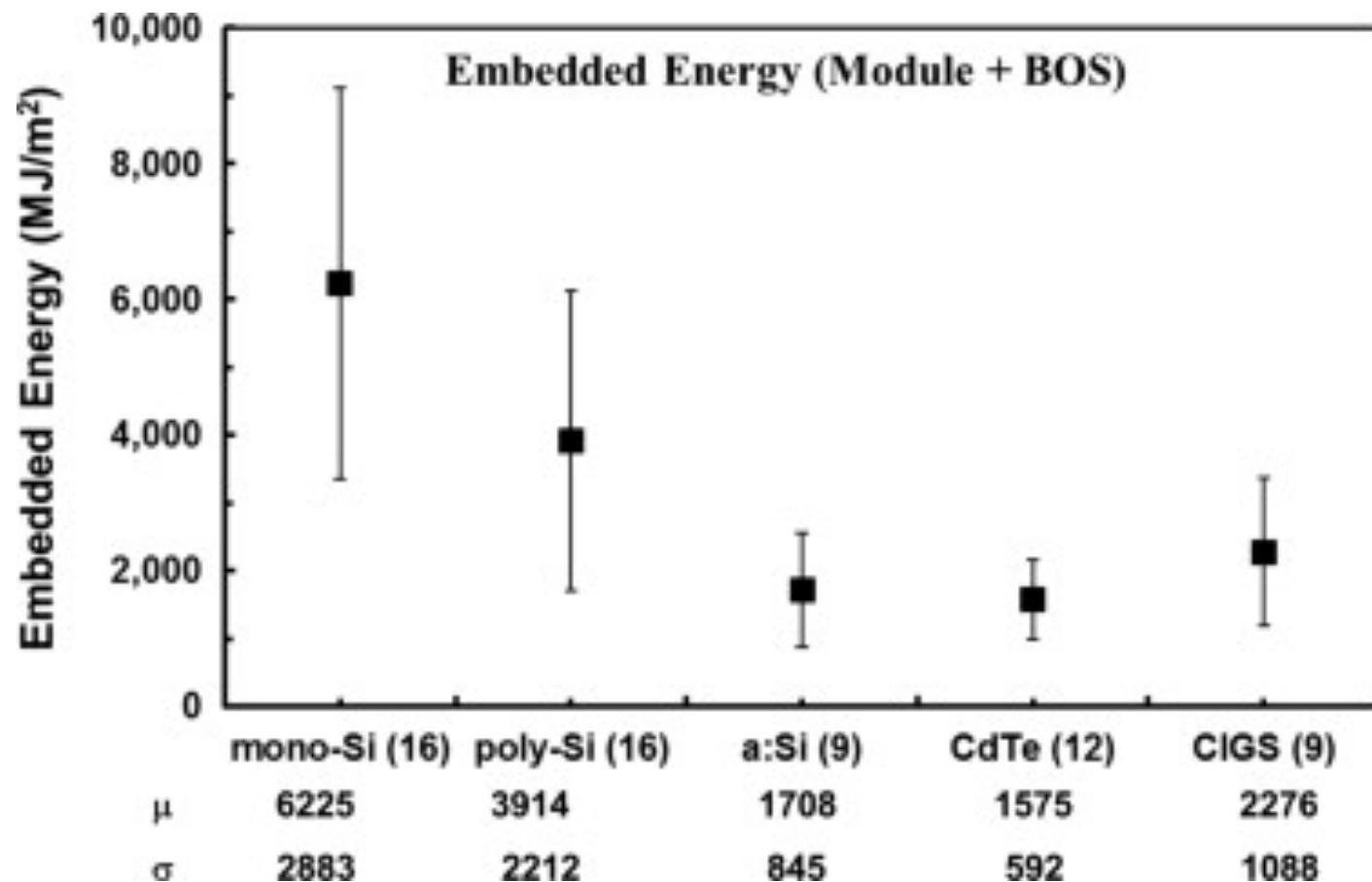
C-Si record cell



The high cost of crystalline Si

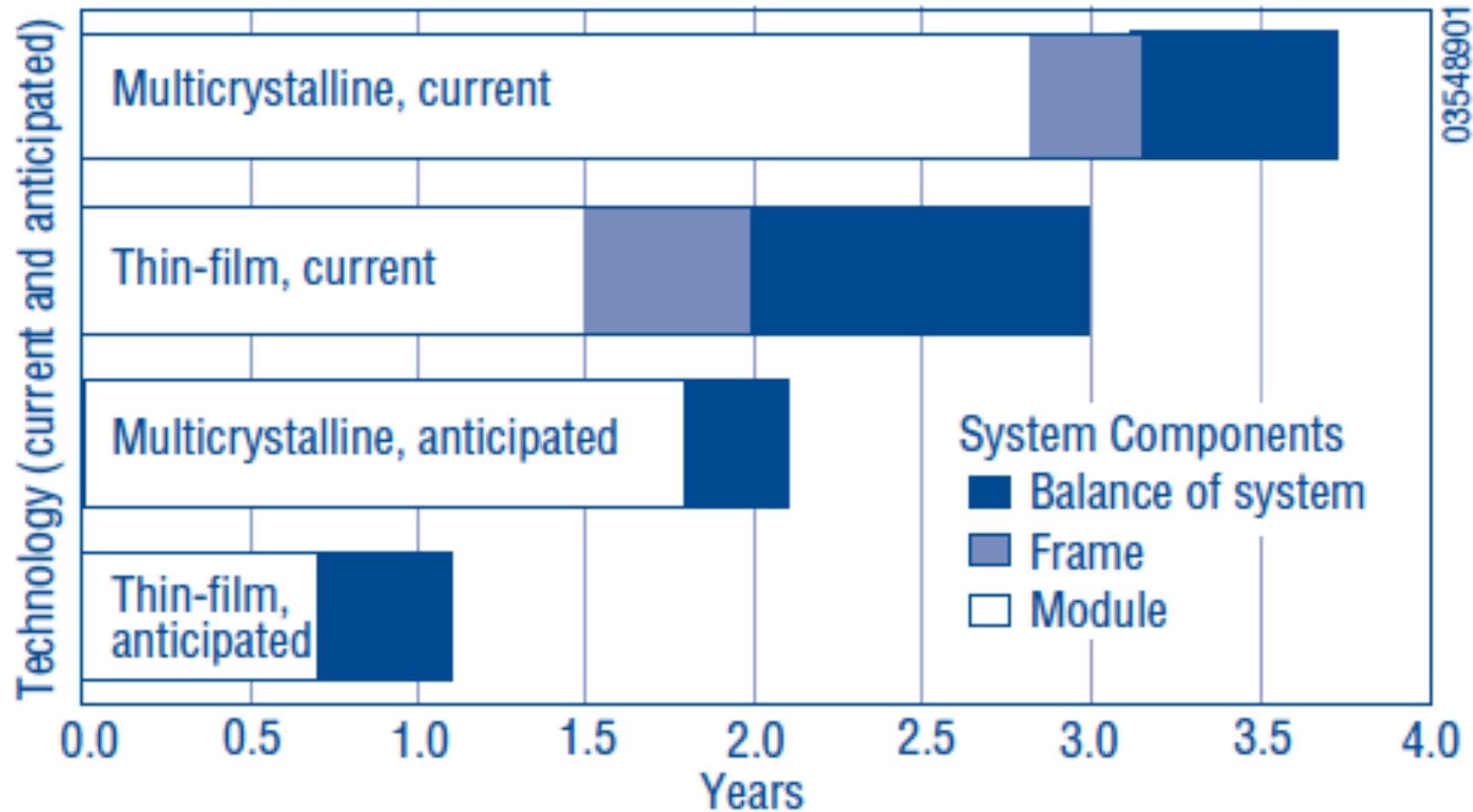


Your money back

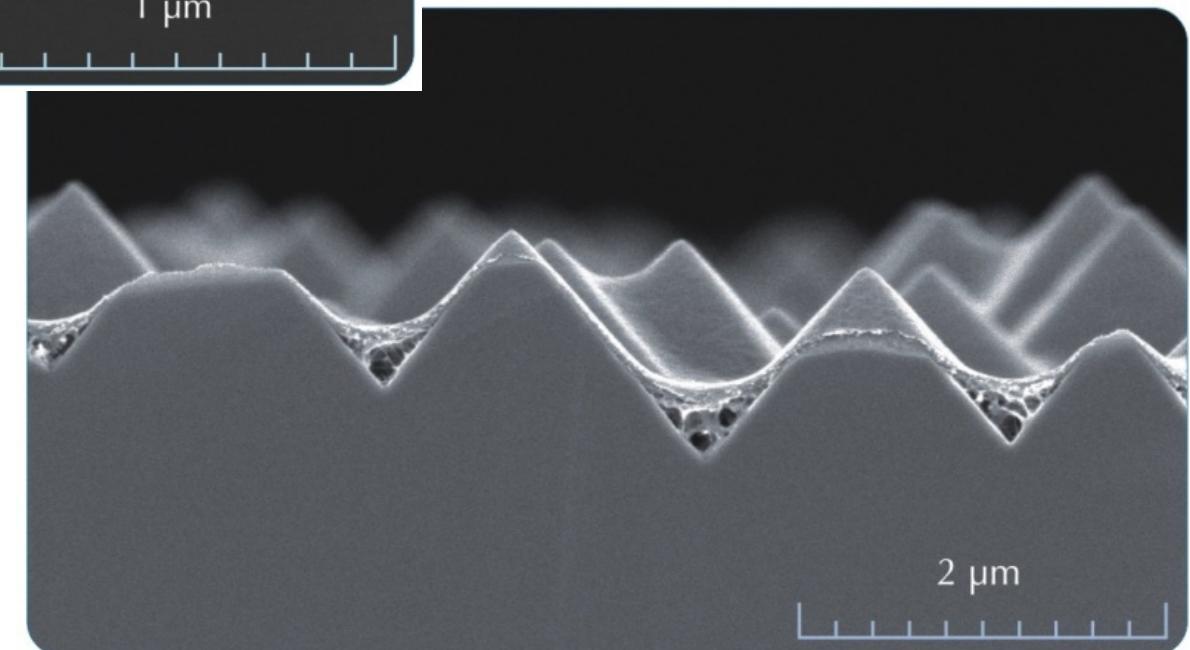
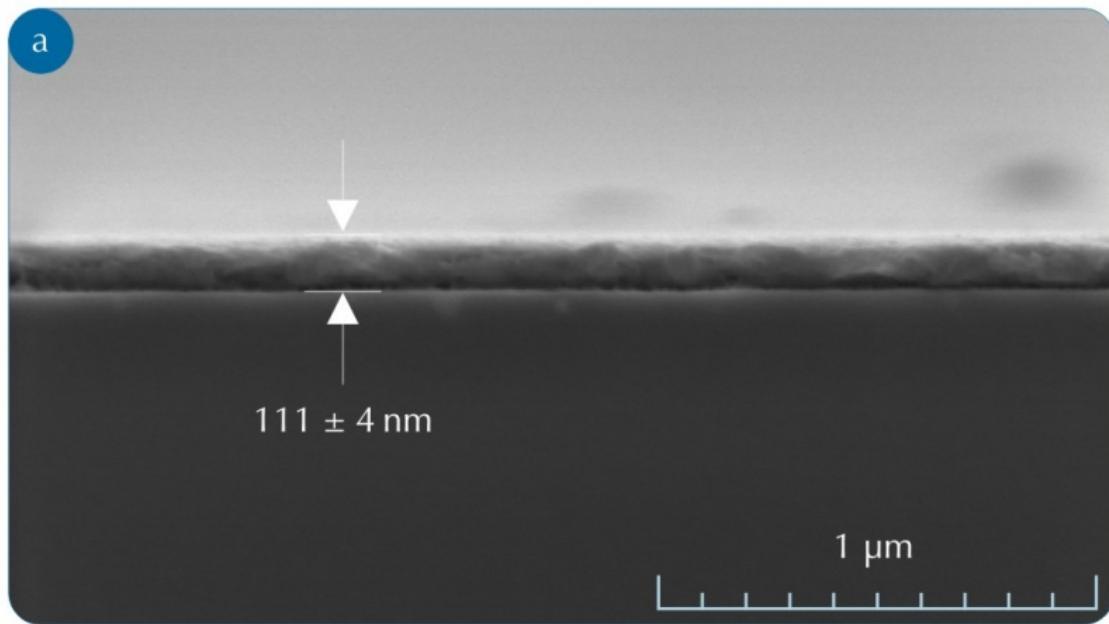


Your money back

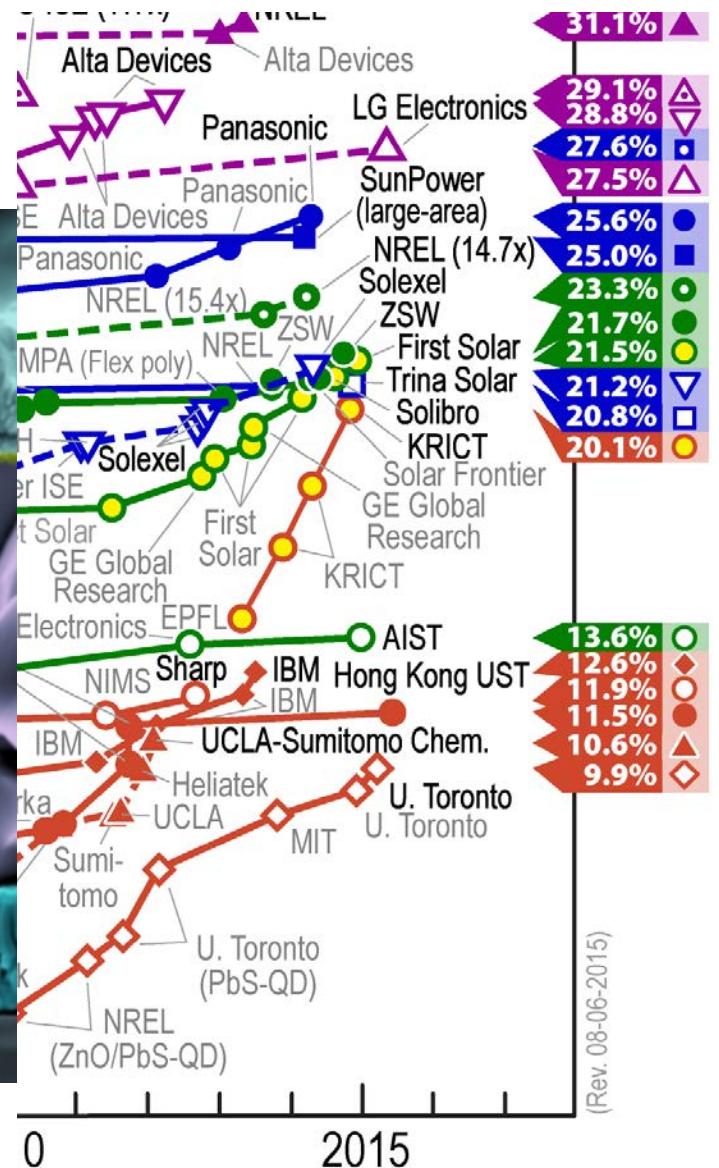
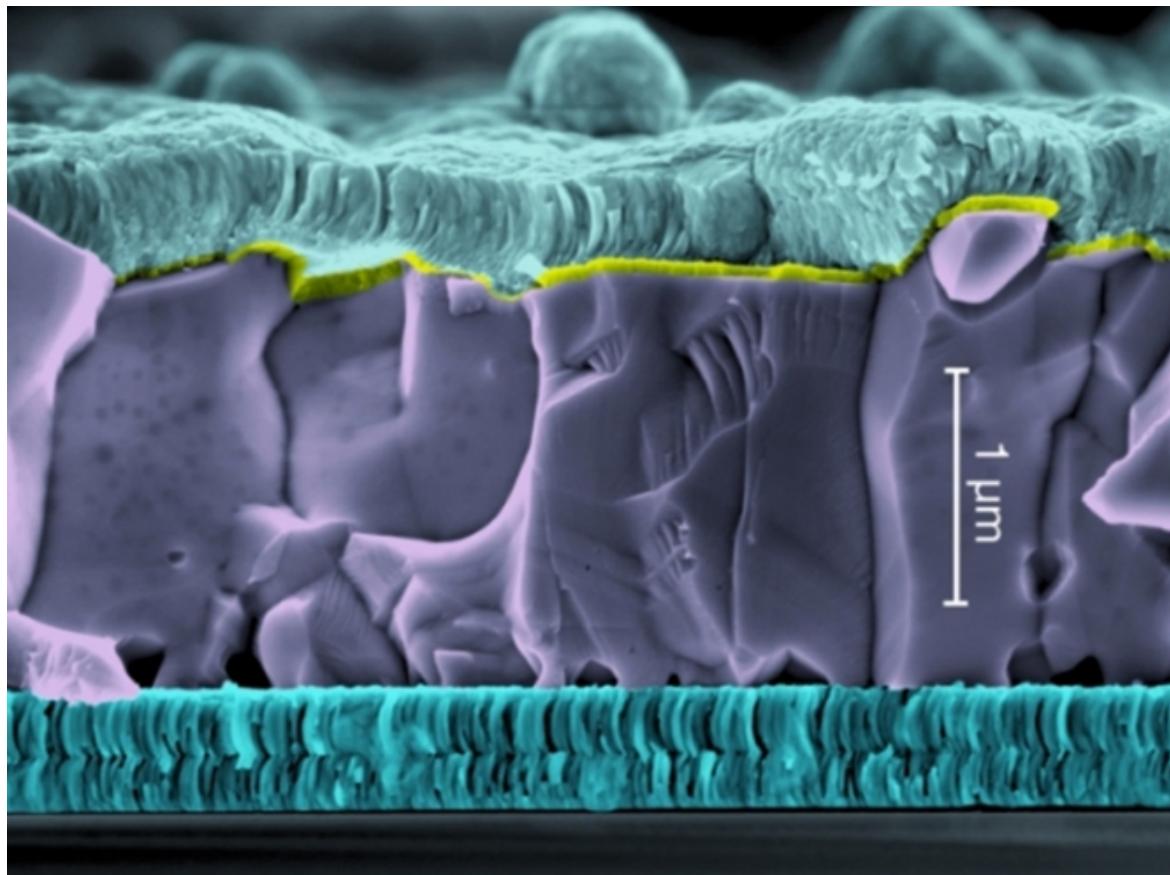
Figure 1. Energy Payback for Rooftop PV Systems



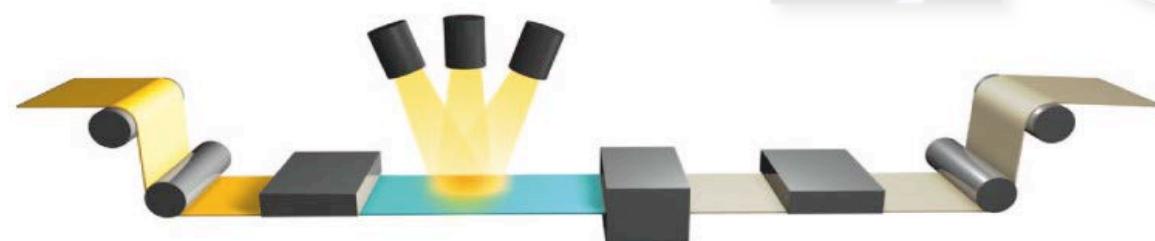
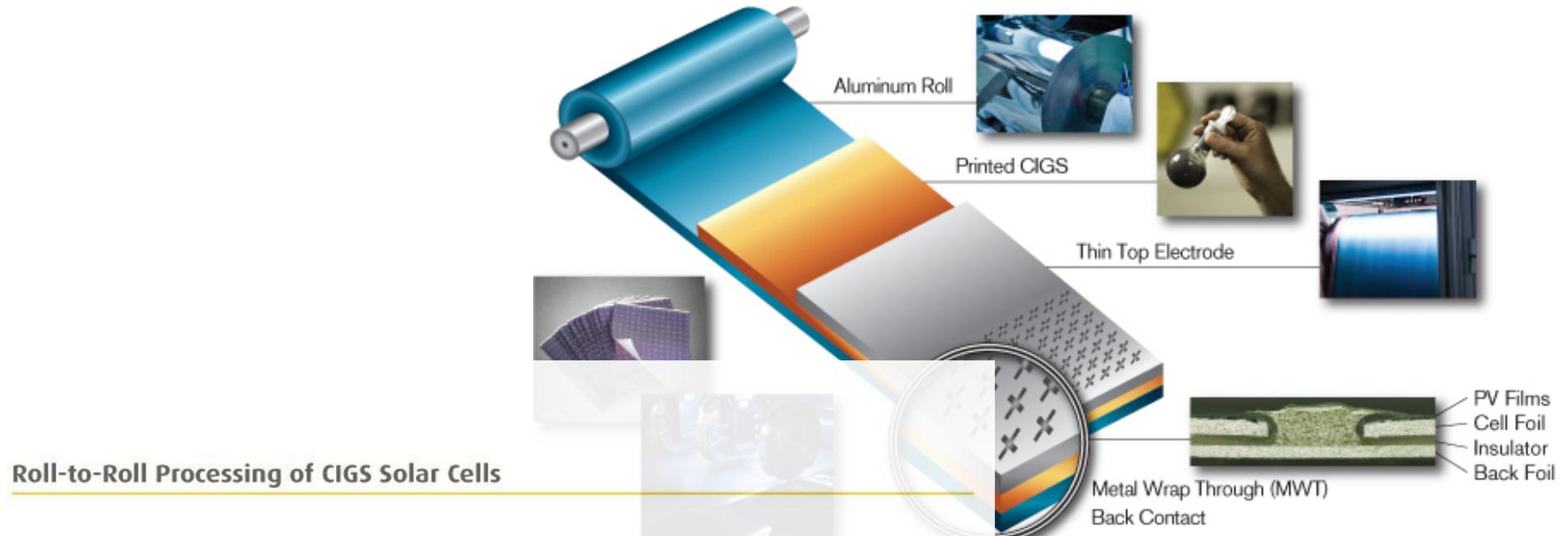
The beauty of c-Si



CIGS: a different kind of beauty



Let it roll

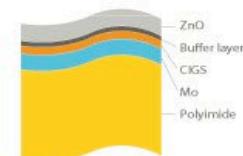


layer	backside contact	absorber layer	buffer layer	front side contact
process step	(Mo) deposition	(CIGS) ion beam supported low temperature deposition	wet chemical deposition	(ZnO) deposition

thin film solar cells

copper, indium, selenium in the compound CuInSe_2 or with gallium in the mixed phase $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$

lightweight and super thin



Flex it!



The CIGS efficiency Gold Rush



Media release

Press Release 12/2014

Stuttgart, September 22, 2014

ZSW Brings World Record Back to Stuttgart

New best mark in thin-film solar performance with 21.7 percent efficiency

The Centre for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg (ZSW) has set a new world record in thin-film photovoltaics. Scientists in Stuttgart achieved 21.7 percent efficiency with a solar cell made of copper indium gallium diselenide (CIGS). ZSW succeeded in bringing the record back to the institute with this cell's performance. Swedish researchers achieved a new best mark in June, which has now been surpassed by 0.7 percentage points. The progress underway in the southwest of Germany is helping to make solar power more affordable.

PRESS RELEASES > 2015

Duebendorf, St. Gall, Thun, 17 January 2013

Empa takes thin film solar cells to a new level

A new world record for solar cell efficiency

In a remarkable feat, scientists at Empa, the Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, have developed thin film solar cells on flexible polymer foils with a new record efficiency of 20.4% for converting sunlight into electricity. The cells are based on CIGS semiconducting material (copper indium gallium (di)selenide) known for its potential to provide cost-effective solar electricity.



Tuesday, 08. December 2015

Solar Frontier Achieves World Record Thin-Film Solar Cell Efficiency: 22.3%

Tokyo – 8th December, 2015 – Solar Frontier, the world's largest CIS solar energy provider, has set a new world record for thin-film solar cell efficiency. In joint research with the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) of Japan, Solar Frontier achieved 22.3% conversion efficiency on a 0.5cm² cell using its CIS technology. This is an increase of 0.6 percentage points over the industry's previous thin-film record of 21.7%. The Fraunhofer Institute, Europe's largest organization for applied research, has independently verified this result.



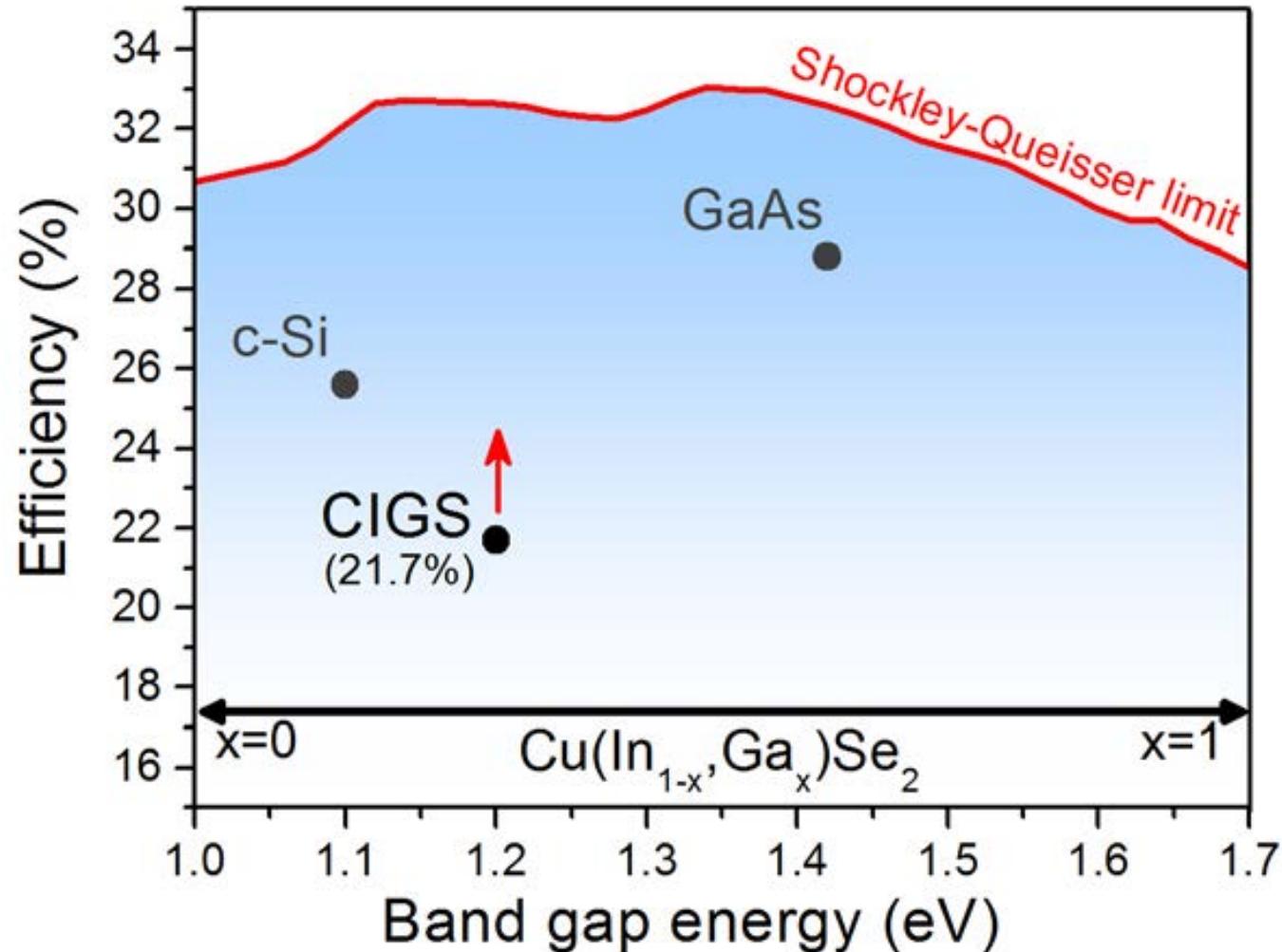
HORIZON 2020
The EU Framework Programme for Research and
Innovation



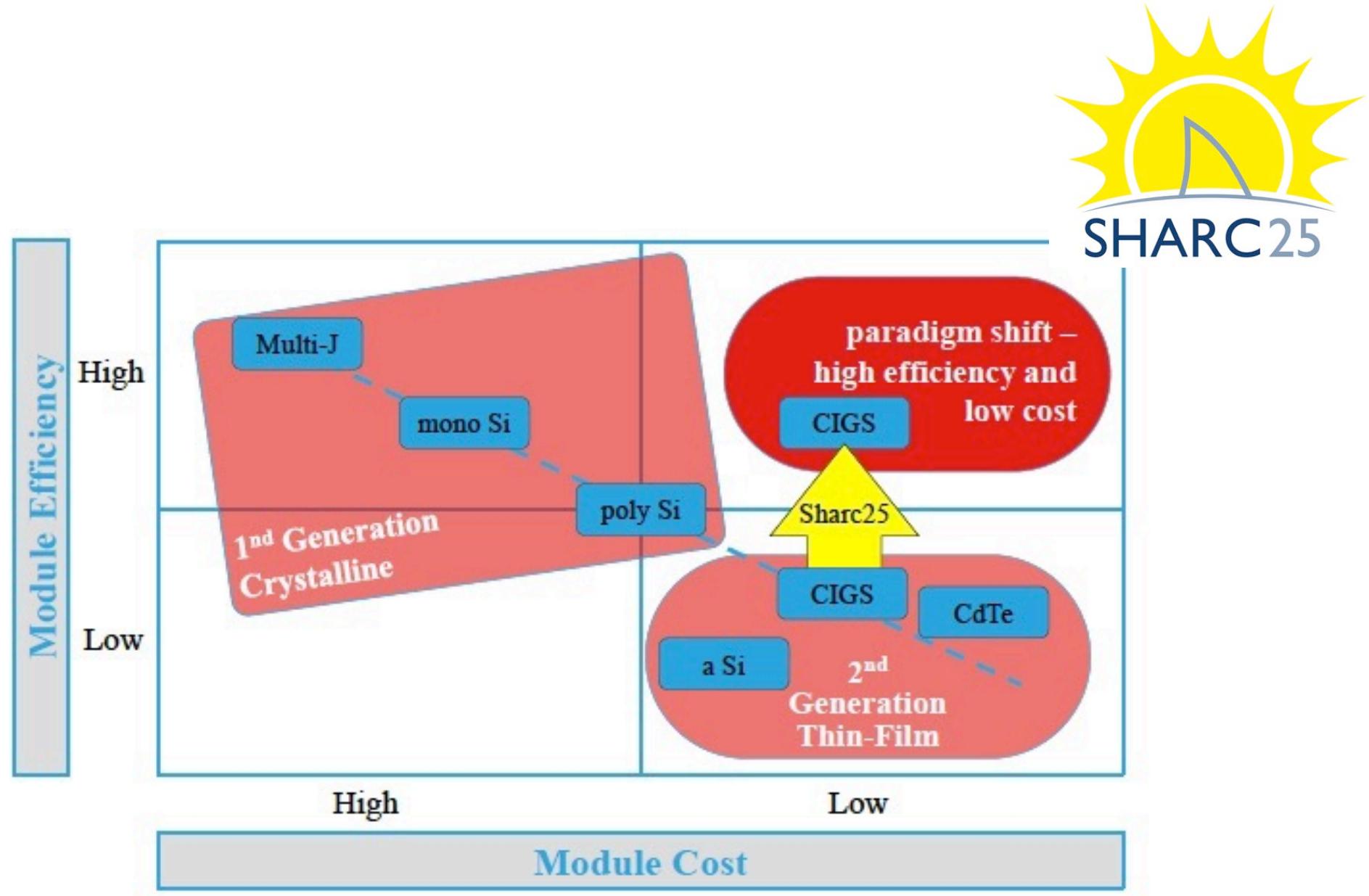
(2015-2018) Project SHARC25: “Super-High Efficiency Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells Approaching 25%”



Sharc25: the goal



Sharc25: the goal



Parte V:

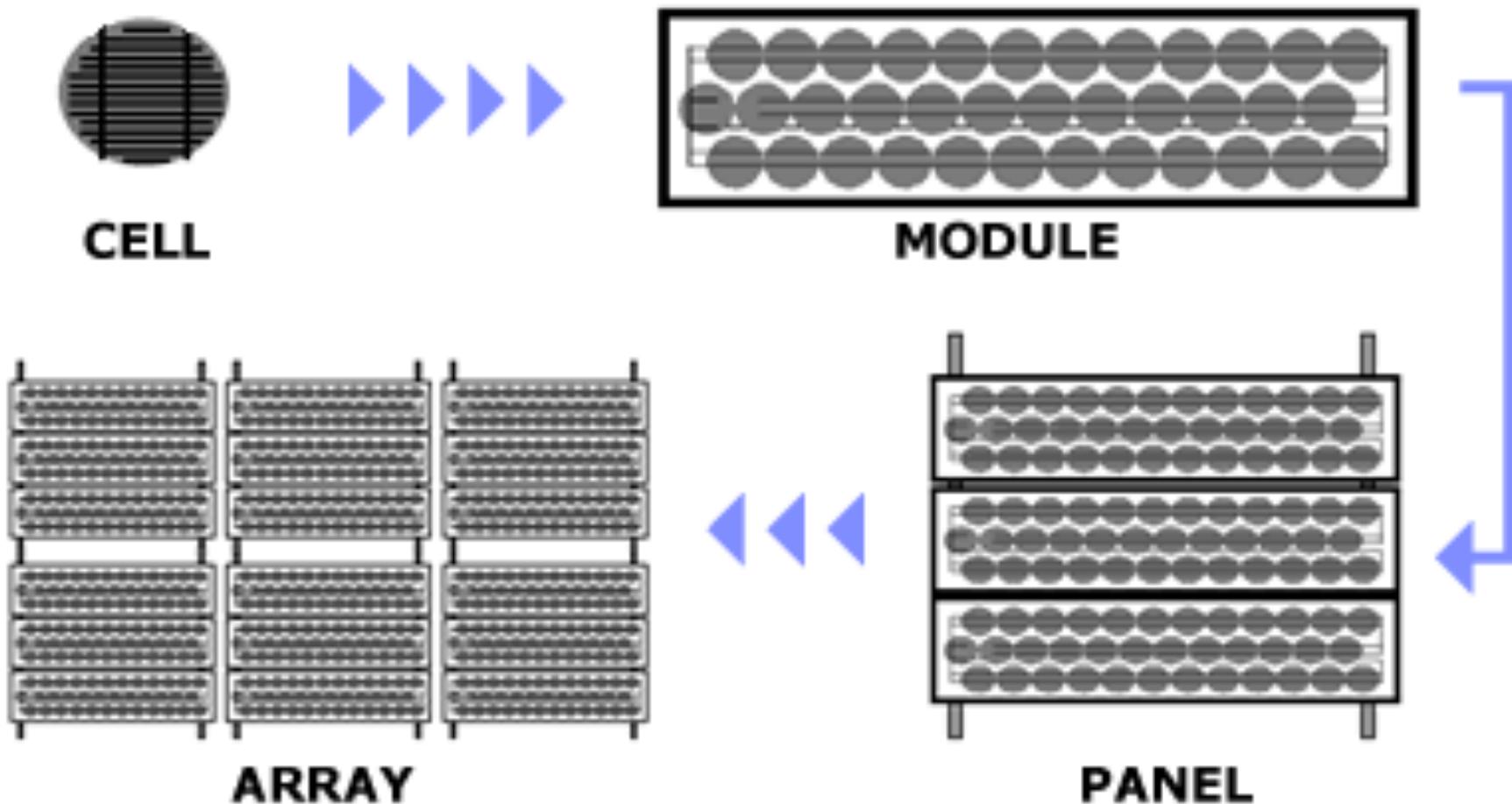
**in cui si allarga
la prospettiva
ai sistemi fotovoltaici**

Energia dal sole

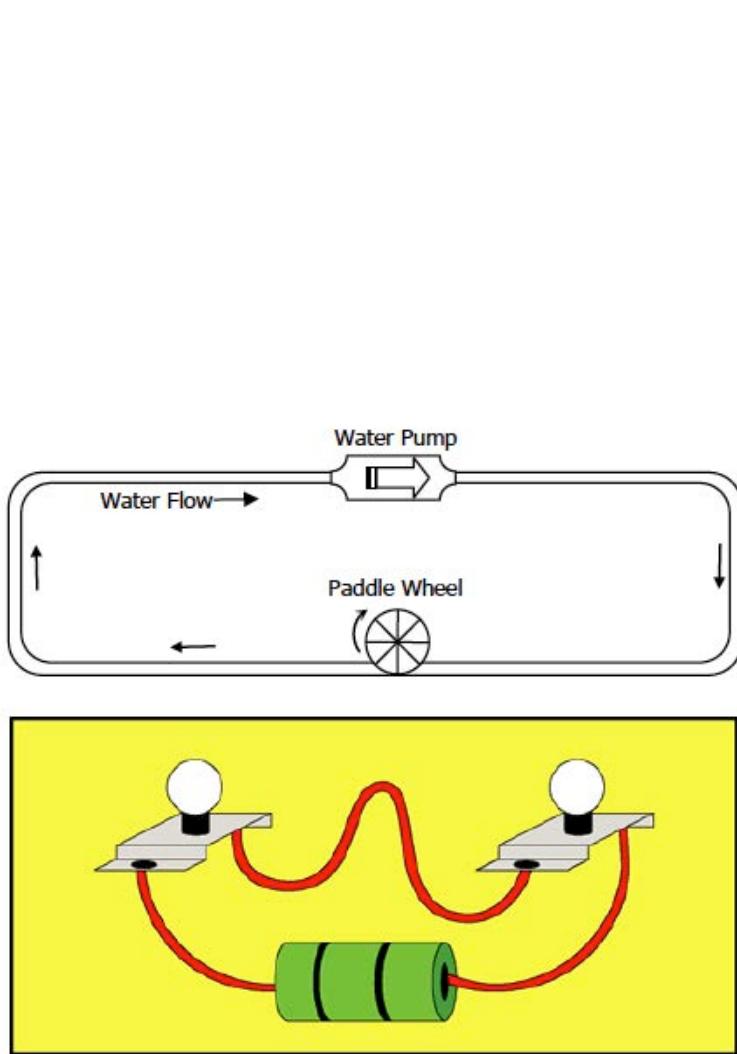
Liceo Ariosto-Spallanzani – Reggio Emilia, 16 aprile 2016

Getting more power out

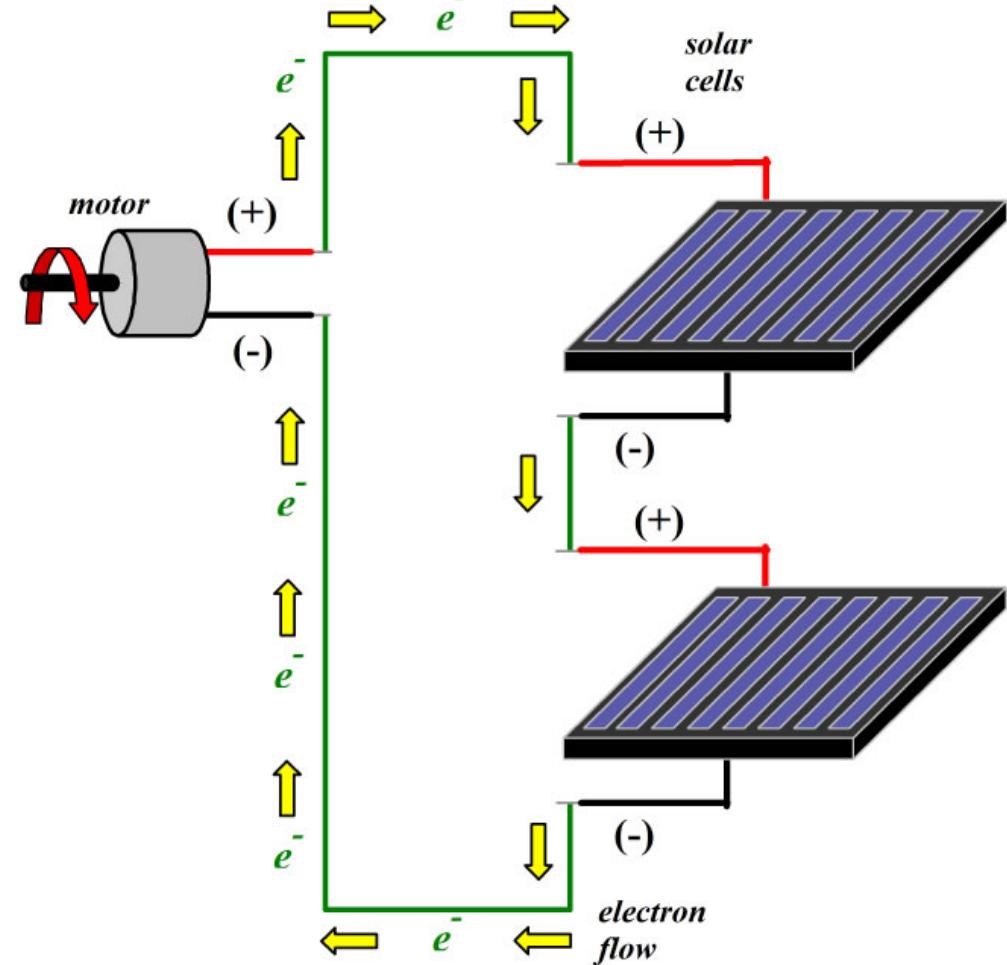
From Cell to Array



Cells in series (more voltage)

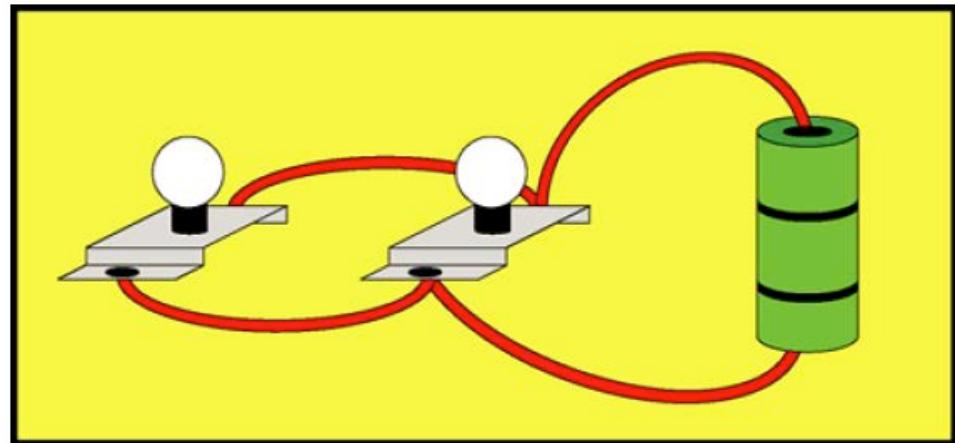


Solar Cells in Series

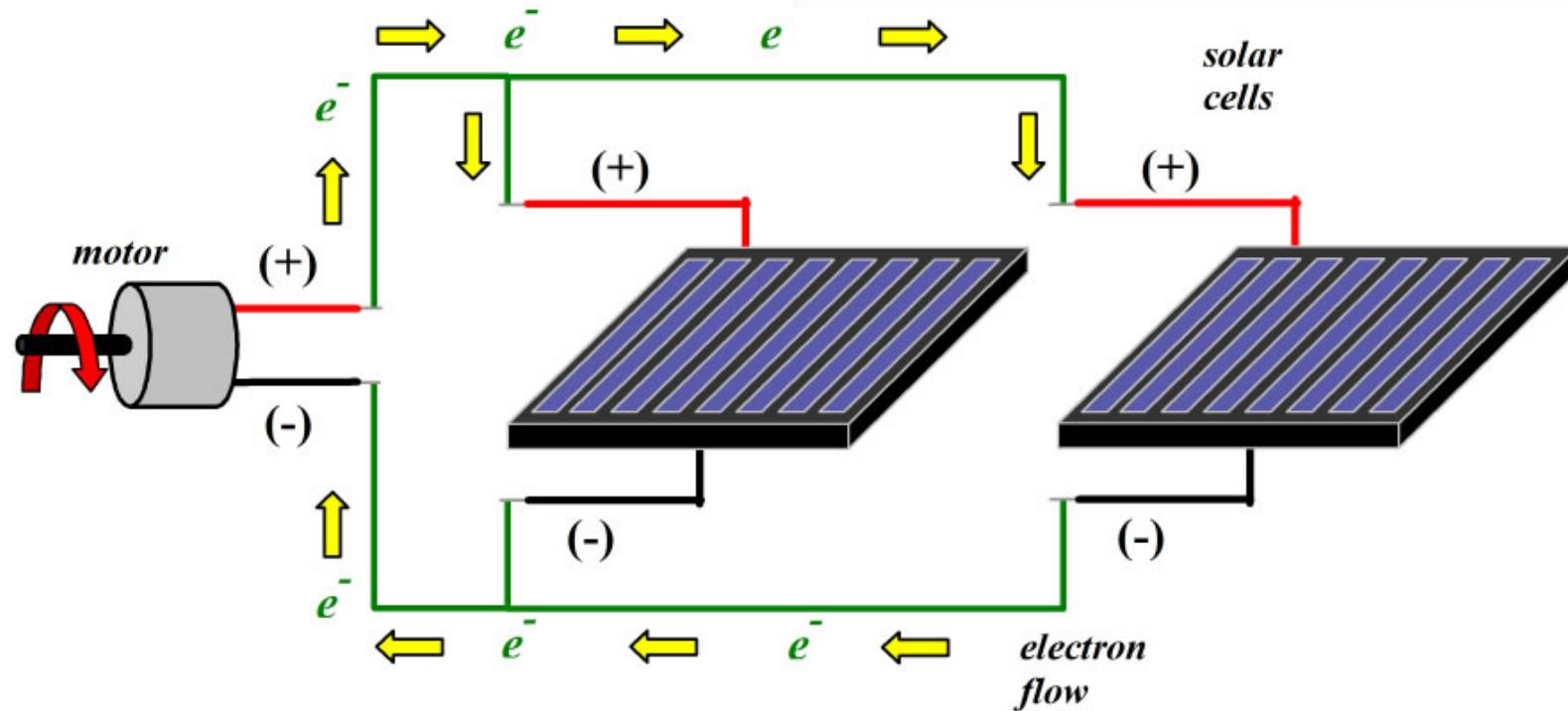


Copyright © 2004 www.makeitsolar.com All rights reserved.

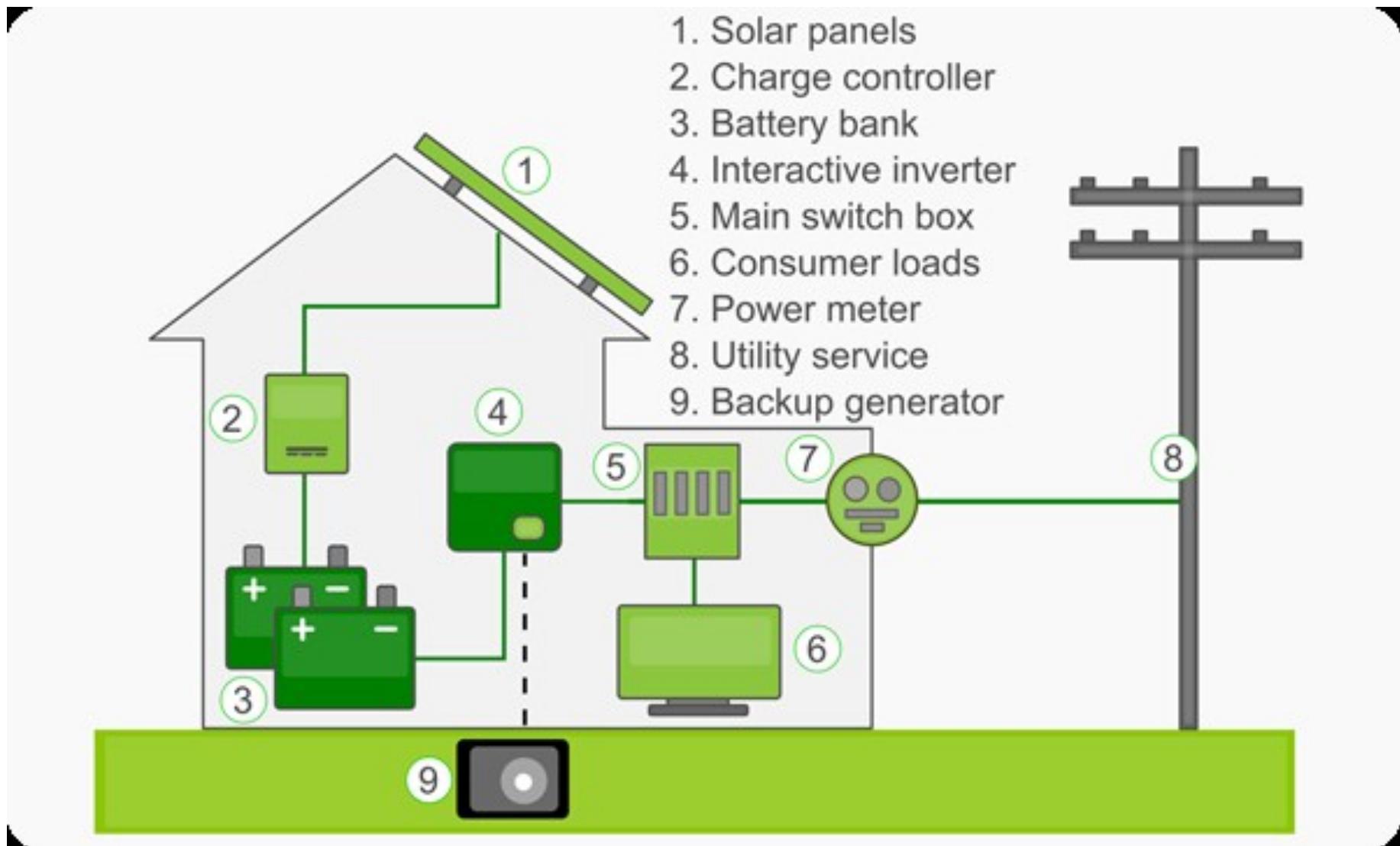
Cells in parallel (more current)



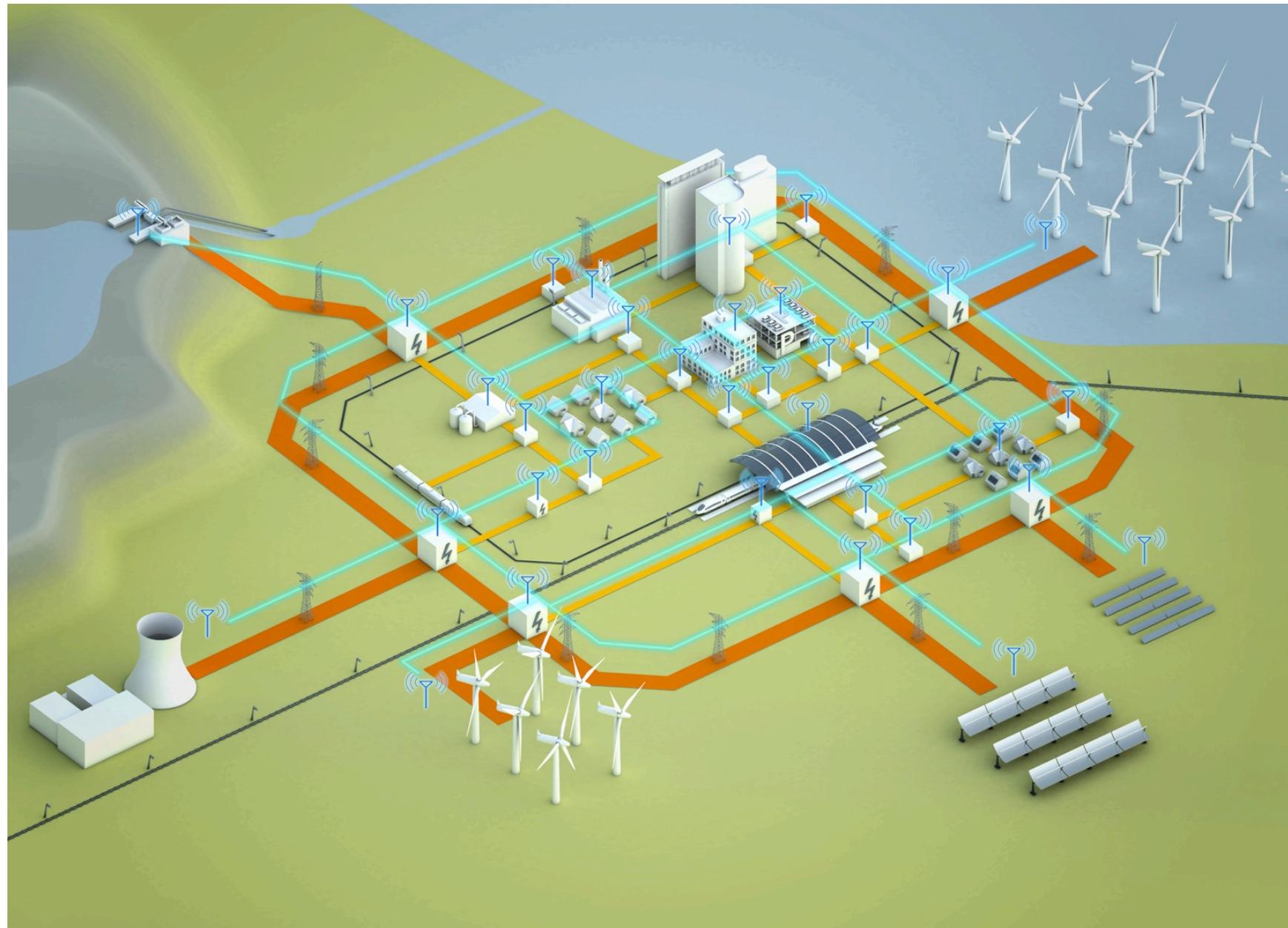
Solar Cells in Parallel



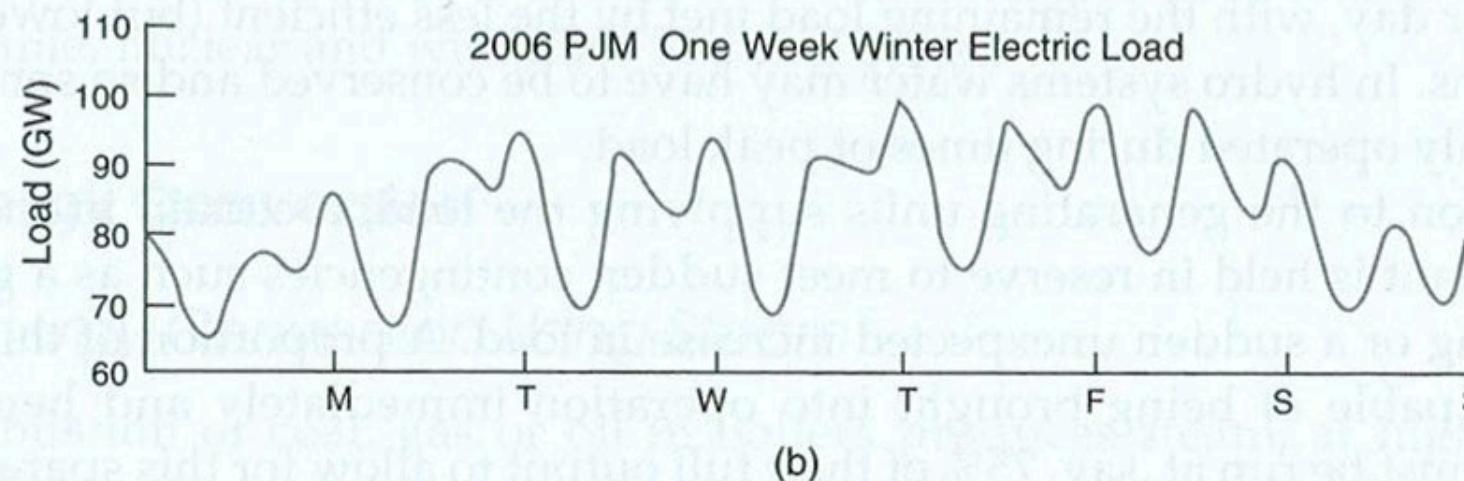
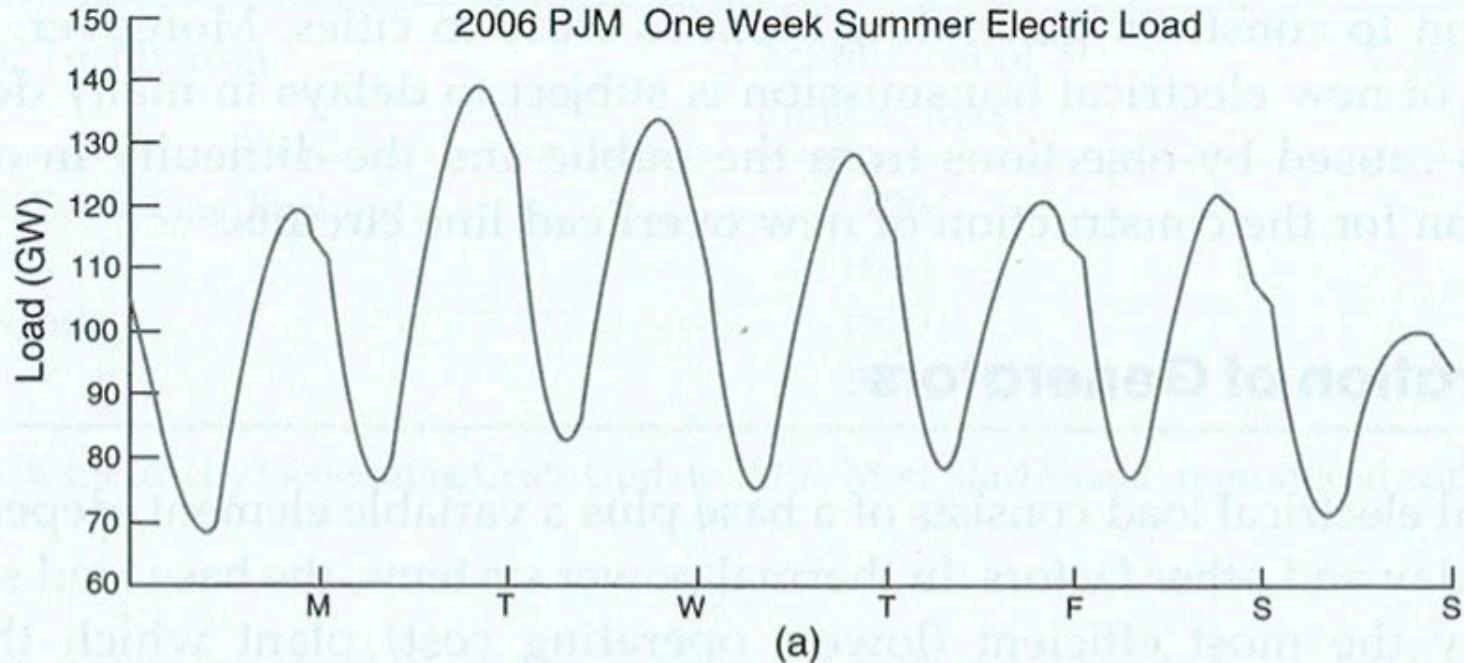
Rooftop grid-connected PV system



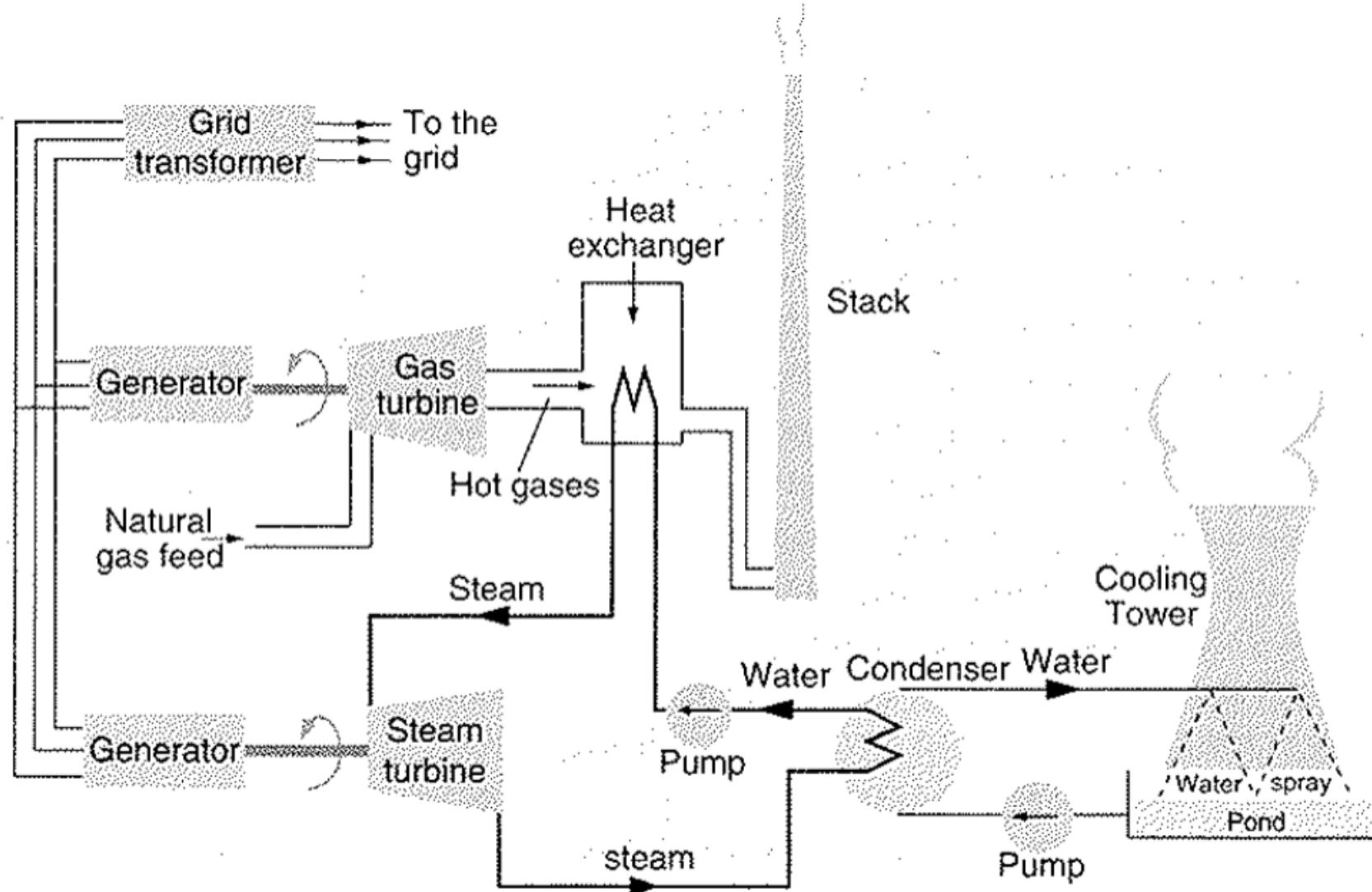
Integrating RE sources in the network



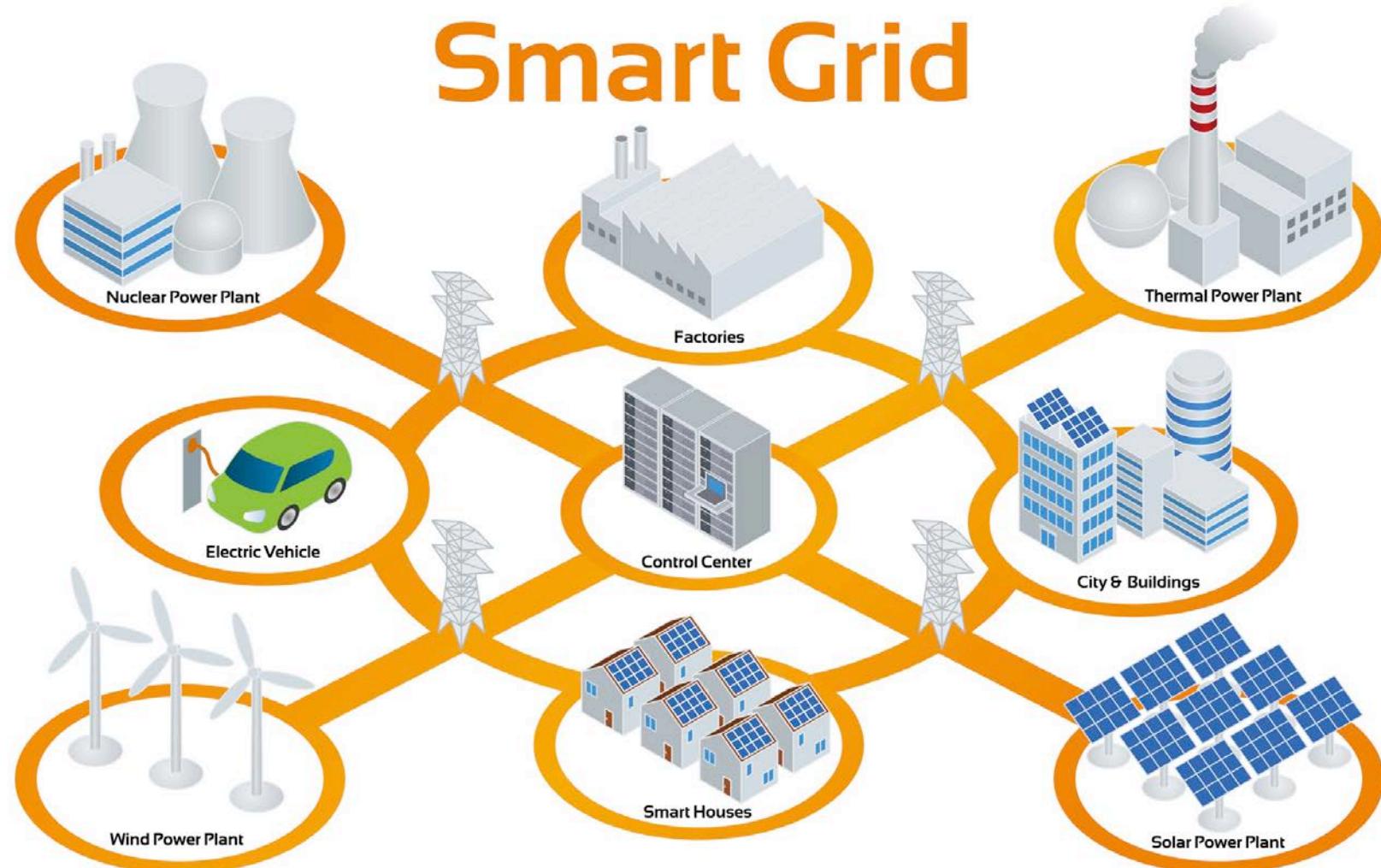
Integrating RE sources in the network



Integrating RE sources in the network



Integrating RE sources in the network



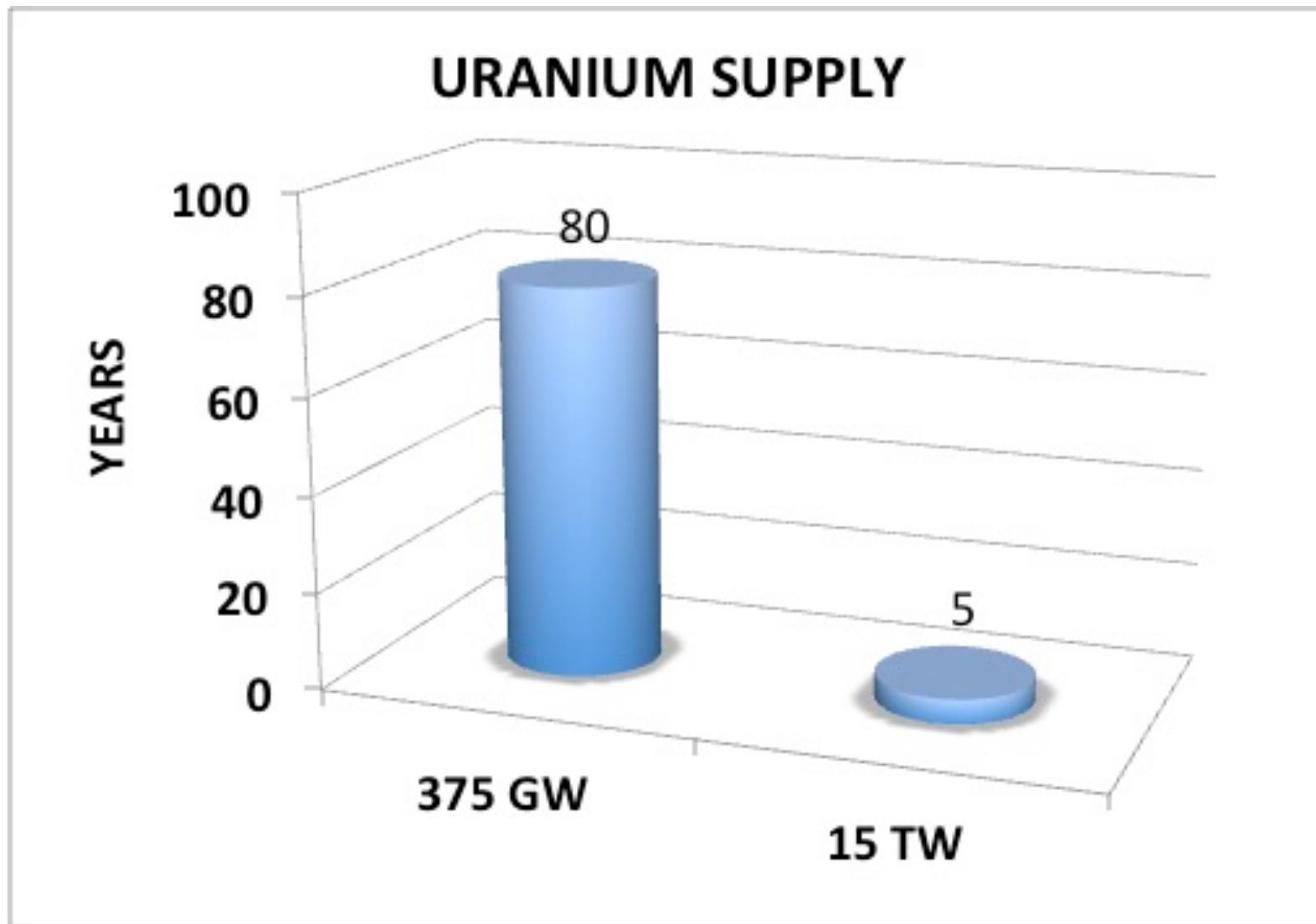
Grazie.

roberto.menozzi@unipr.it

Energia dal sole

Liceo Ariosto-Spallanzani – Reggio Emilia, 16 aprile 2016

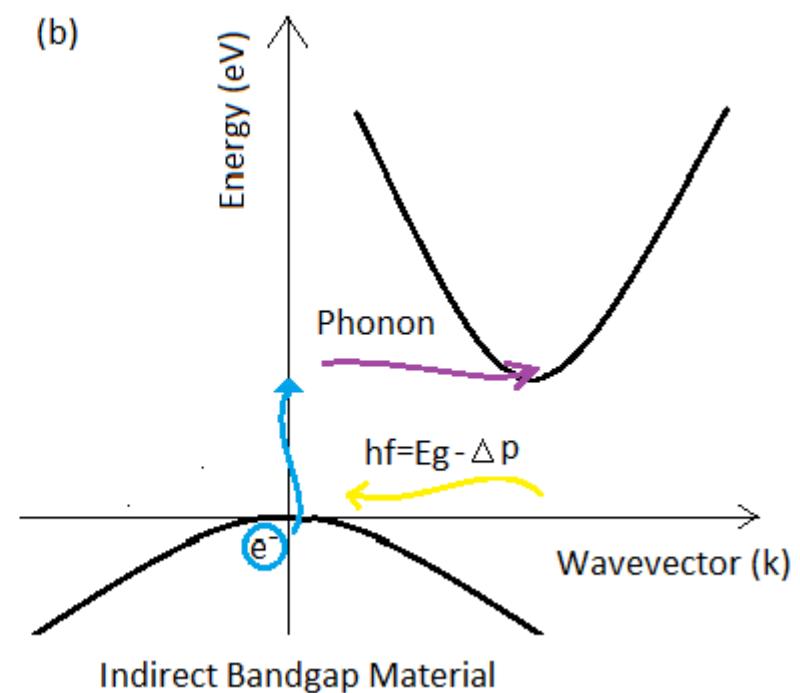
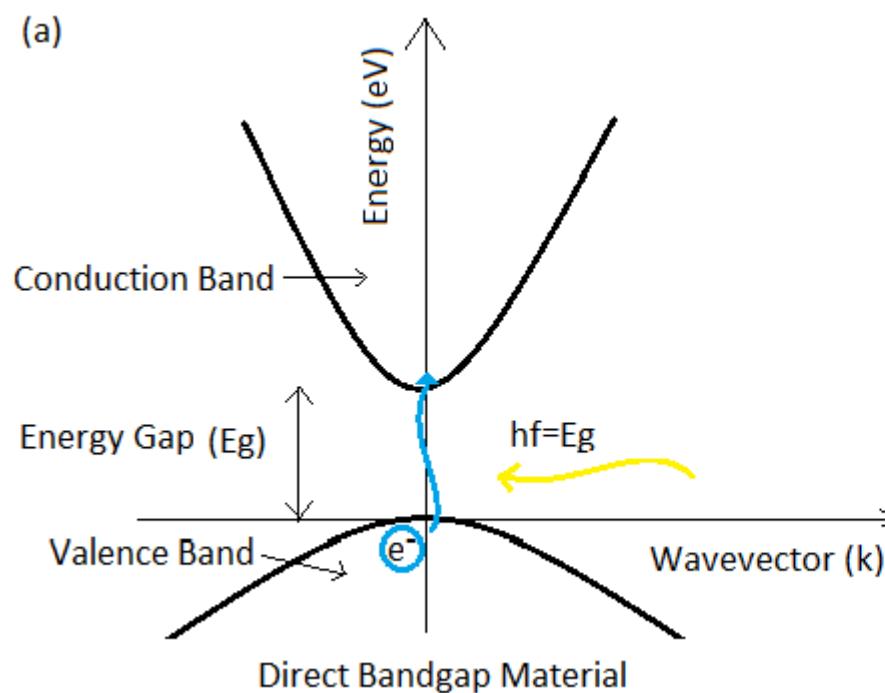
Nuclear power scalability



Wind power generation scalability

- Available power: **72 TW**
- Conversion of sun power into wind power:
 - $\eta = 0.1\%$  **large footprint**
 - 350 km²/GW**  **600 km x 600 km for 1 TW**
(10 km²/GW for photovoltaics)
- Environmental impact (example):
 - bird fatalities 0.8 – 2 / (MW x year)**
 - min 12 – 30 million birds / year for 15 TW**

Direct & indirect bandgap



Efficiency vs. absorber bandgap

