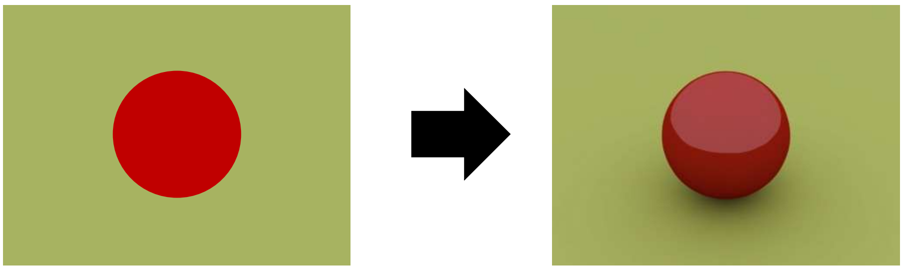
Marco Tarini - Computer Graphics 2020/2021
Università degli Studi di Milano

Lighting

1

Lighting



2

Lighting: intro

- ✓ L'altra metà del rendering
- ✓ Determinare la luce
  - ⇒ quanta luce
  - ⇒ di che colore

  che arriva
  - ⇒ da un punto della scena
  - ⇒ all'occhio
- ✓ Problema complesso...

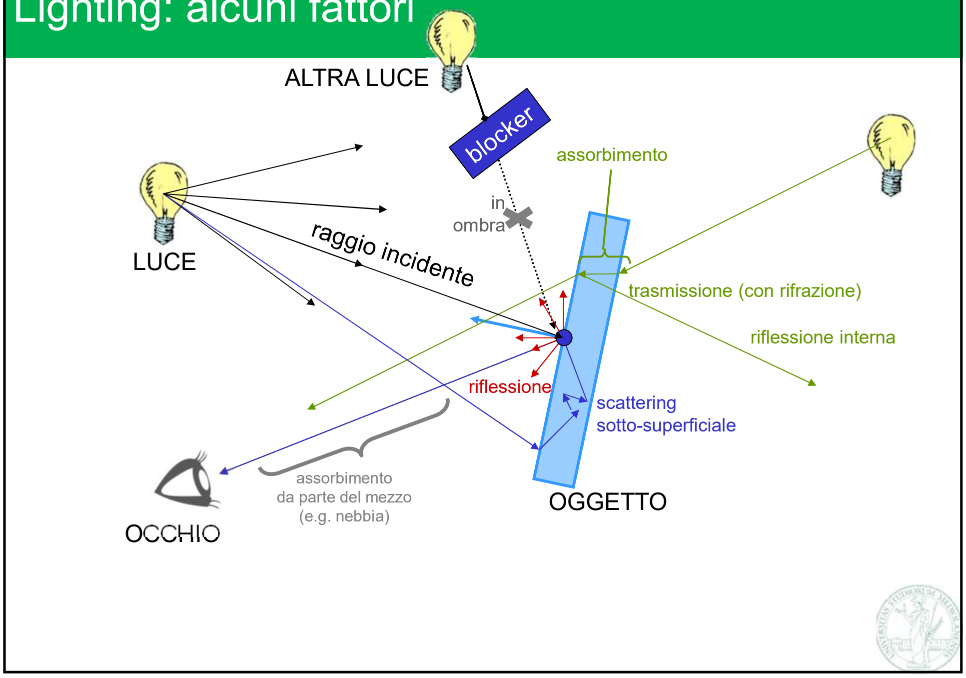
3

Lighting: intro

- ✓ Output:
  - ⇒ colore percepito per un dato punto
- ✓ Input:
  - ⇒ caratteristiche dell'oggetto illuminato ("materiale")
    - (es: carta bagnata, plastica ruvida, …)
    - (o banalmente, «di che colore è» - vedi poi)
  - ⇒ caratteristiche della luce che illumina
    - (dove sono le fonti, che intensità / colore hanno)
  - ⇒ e forma degli oggetti / della scena
    - soprattutto, orientamenti delle superfici, cioè le normali

4

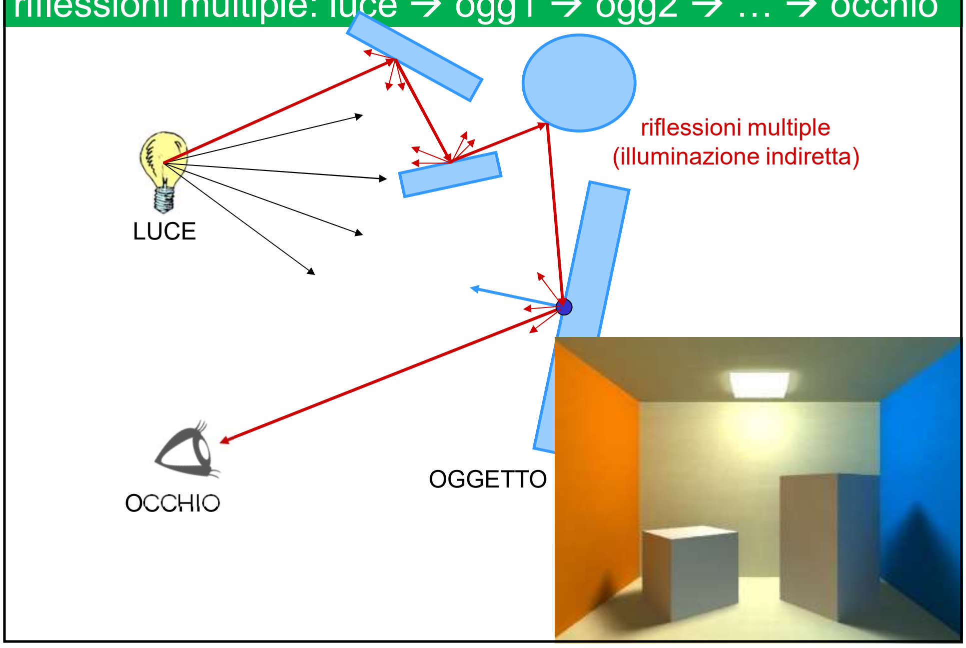
Lighting: alcuni fattori



5

Lighting: alcuni fattori

riflessioni multiple: luce → ogg1 → ogg2 → … → occhio



6

Lighting: globale VS locale

Illuminazione locale

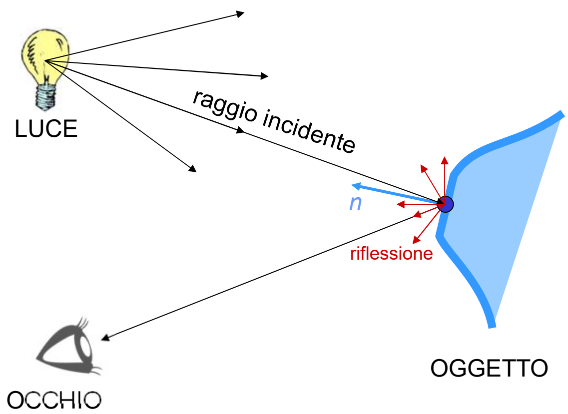
Illuminzione globale

- ⇒ riflessioni multiple
- ⇒ ombre
- ⇒ scattering sottosuperficiale
- ⇒ rifrazione
- ⇒ ...

torna molto più facile da fare con il nostro Hardware

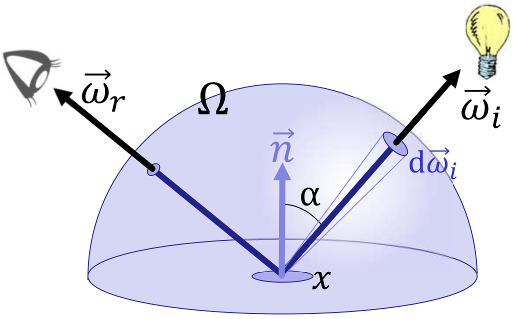
7

Lighting locale: emitter → oggetto → occhio (e nient'altro!)



8

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza



$$L_o(x, \vec{\omega}_r) = L_e(x, \vec{\omega}_r) + L_r(x, \vec{\omega}_r)$$

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r)\, L_i(x, \vec{\omega}_i)\, \cos(\alpha)\, d\vec{\omega}_i$$

9

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza [simboli]

x punto sulla superficie da illuminare;

$\vec{\omega}_r$ direzione da *x* verso la posizione dell'osservatore

$\vec{\omega}_i$ direzione da cui proviene il raggio di luce incidente

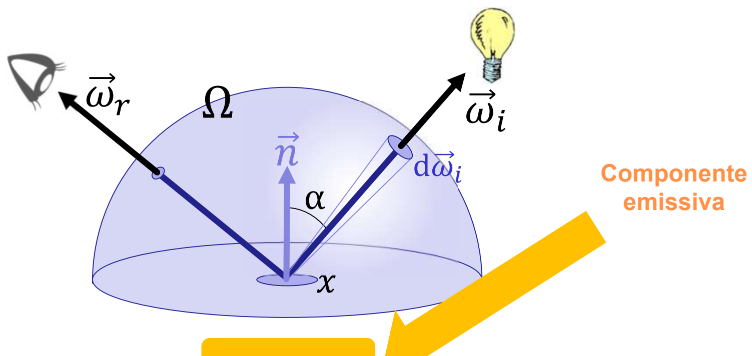
$L_i(x, \vec{\omega}_i)$ quantità di luce incidente:
luce esterna che raggiunge *x* dalla dir w_i

$(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})$ coseno dell'angolo di incidenza rispetto alla normale alla superficie (vedi dopo)

Ω dominio di tutte le direzioni possibili
(cioè tutte i vettori normalizzati… che arrivano da davanti)
(cioè la sup. della semi-sfera unitaria)

10

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza



$$L_o(x,\vec{\omega}_r) = \boxed{L_e(x,\vec{\omega}_r)} + L_r(x,\vec{\omega}_r)$$

$$L_r(x,\vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(x,\vec{\omega}_i,\vec{\omega}_r) L_i(x,\vec{\omega}_i)(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})\, d\vec{\omega}_i$$

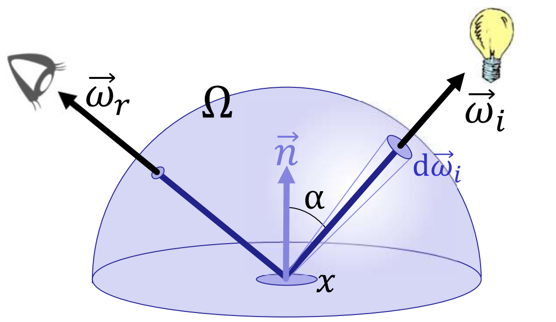
11

Componente emissiva

- ✓ Usata solo per quei pochi materiali che emettono luce propria
  - ⇒modella solo il percorso: emitter→occhio (non emitter→oggetto→occhio)
  - ⇒cioè la luce emessa non illumina nient'altro

12

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza



Ambiente di illuminazione

$$L_o(x,\vec{\omega}_r) = L_e(x,\vec{\omega}_r) + L_r(x,\vec{\omega}_r)$$

$$L_r(x,\vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(x,\vec{\omega}_i,\vec{\omega}_r)\boxed{L_i(x,\vec{\omega}_i)}(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})d\vec{\omega}_i$$

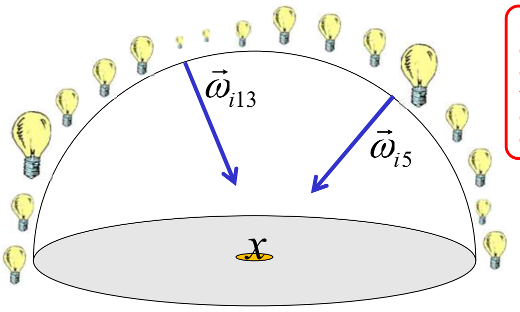
13

Luce incidente

✓ Per ogni posizione x
$L_i(x, \ldots)$ modella
la distrubuz di luce incidente

$L_i(x,\vec{\omega}_i)$ = quanta luce arriva addosso ad x dalla direzione $\vec{\omega}_i$

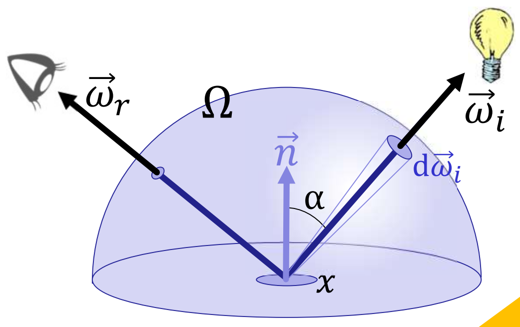
Modella gli *ambienti di illuminzaione* possibili. Es:
- stanza con finestra aperta
- giornata di sole
- gioranta coperta
- una discoteca



Cioè (nella metafora dei lucidi successivi) quante "palle da tennis" arrivano ad x da ciascuna direzione!

14

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza



BRDF

$$L_o(x,\vec{\omega}_r) = L_e(x,\vec{\omega}_r) + L_r(x,\vec{\omega}_r)$$

$$L_r(x,\vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} \boxed{f_r(x,\vec{\omega}_i,\vec{\omega}_r)} L_i(x,\vec{\omega}_i)(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})\, d\vec{\omega}_i$$

15

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza [parametri]

$f_r(x,\vec{\omega}_i,\vec{\omega}_r)$ funzione che determina la frazione di luce incidente che viene riflessa nelle varie direzioni (risponde a: "*quanta della luce che arriva in* x *dalla dir* w_i *sarà riflessa proprio verso* w_r *?* ")

- ✓ E' la funzione che descrive il materiale dell'oggetto
  - ⇒ e la sua distribuzione sulla superficie
- ✓ Se è costante in x ⇒ materiale uniforme:
  - ⇒ stesso materiale in ogni punto
  - ⇒ la funz (senza il 1mo parametro) prende nome di **BRDF** di quel materiale
  - ⇒ **BRDF** = Bidirectional Reflectance Distribution Function)
    - descrive le proprietà ottiche del materiale (per es: se è lucido, se ha riflessi porpora, se è opaco, o cangiante – come il velluto, o metallico, cromato… etc, etc)

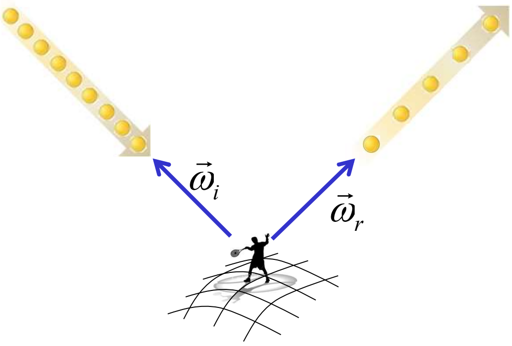
16

La BRDF di un materiale

f_r =

fotone =

$f_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r)$ = su 100 che arrivano a dalla dir $\vec{\omega}_i$, quante verrano da lui rimbalzate proprio nella dir $\vec{\omega}_r$? (al variare di $\vec{\omega}_i$ e $\vec{\omega}_r$)



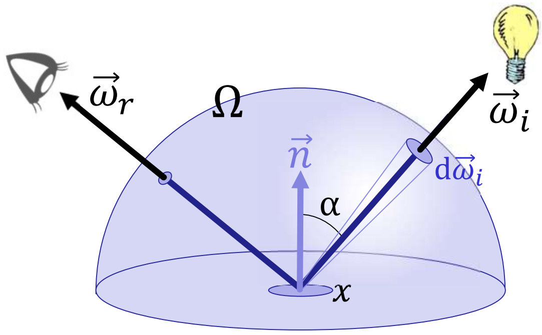
Ogni materiale, la sua BRDF:
- metallo cromato
- raso
- legno
- stoffa
- gesso
- carta
- specchio…

Funzione di 4 dimensioni!

(una direzione = 2 dimensioni)

17

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza



legge del coseno

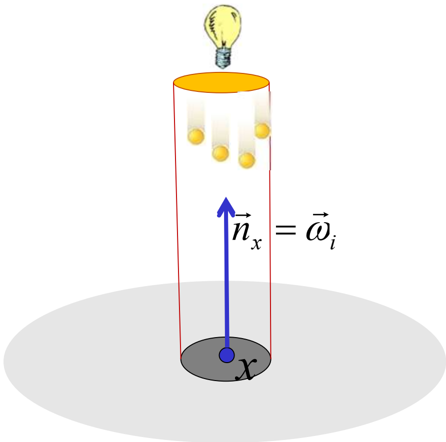
$$L_o(x, \vec{\omega}_r) = L_e(x, \vec{\omega}_r) + L_r(x, \vec{\omega}_r)$$

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) L_i(x, \vec{\omega}_i) \boxed{(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})} d\vec{\omega}_i$$

18

Sottoproblema

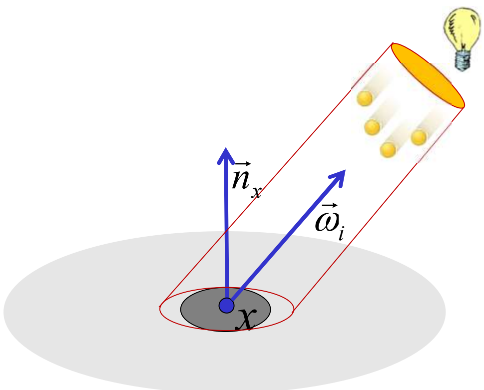
- ✓ Dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens (N "palle da tennis"): quante ne riceve un intorno di x ?



19

Sottoproblema

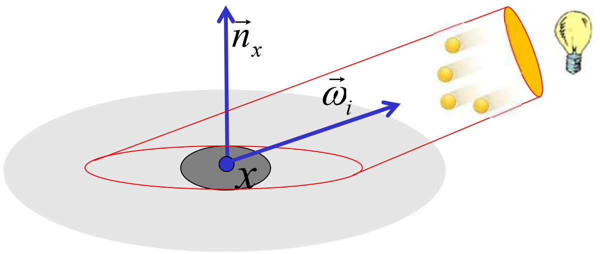
- ✓ Dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens (N "palle da tennis"): quante ne riceve un intorno di x ?



20

Sottoproblema

- ✓ Dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens (N "palle da tennis"): quante ne riceve un intorno di x ?

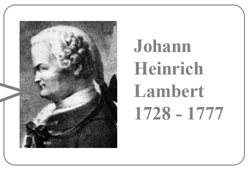


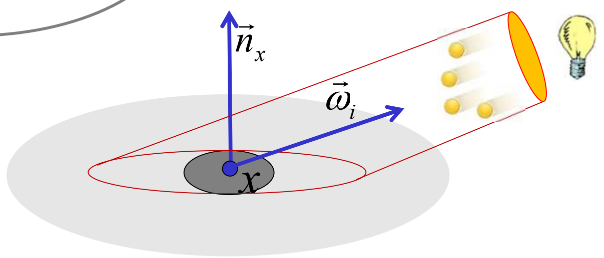
21

Sottoproblema

- ✓ Dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens (N "palle da tennis"): quante ne riceve un intorno di x ?

Soluz: $\cos(\alpha)\,L$
$= (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})\,L$
"La legge del coseno"





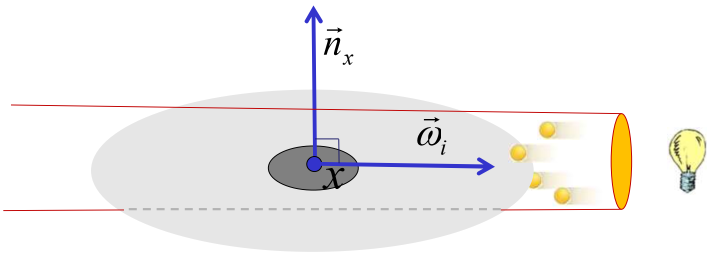
22

Sottoproblema

✓ Dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens (N "palle da tennis"): quante ne riceve un intorno di x ?

Luce perfettamente radente: $(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) = 0$

infatti
nessun fotone colpisce l'intorno!



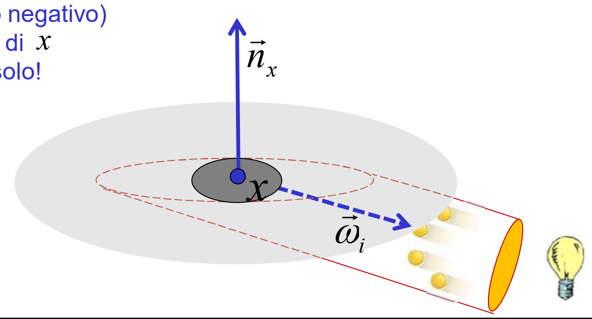
23

Sottoproblema

✓ Dalla dir $\vec{\omega}_i$ arrivano L lumens (N "palle da tennis"): quante ne riceve un intorno di x ?

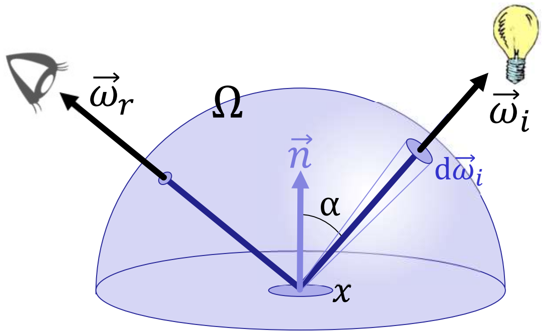
Luce da dietro: $(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) < 0$

risposta: 0
(non un numero negativo)
Perché l'intorno di x
si fa ombra da solo!



24

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza



cos (θ) (ma 0 se negativo)

$$L_o(x,\vec{\omega}_r) = L_e(x,\vec{\omega}_r) + L_r(x,\vec{\omega}_r)$$

$$L_r(x,\vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} f_r(x,\vec{\omega}_i,\vec{\omega}_r) L_i(x,\vec{\omega}_i) \boxed{(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})} d\vec{\omega}_i$$

25

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza (sommario)

$$L_o(x,\vec{\omega}_r) = L_e(x,\vec{\omega}_r) + L_r(x,\vec{\omega}_r)$$

"La luce che riceviamo da un punto *x* della scena è data dalla somma della luce *emessa* (da quel punto) più la luce *riflessa* (da quel punto)"

$$L_r(x,\vec{\omega}_r) = \int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} \overbrace{f_r(x,\vec{\omega}_i,\vec{\omega}_r)}^{(C)} \overbrace{L_i(x,\vec{\omega}_i)}^{(A)} \overbrace{(\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})}^{(B)} \overbrace{d\vec{\omega}_i}^{(D)}$$

"La luce riflessa è calcolata come la somma (nel continuo: l'integrale) dei contributi di tutte le sorgenti luminose presenti nella scena (una potenziale sorgente da ogni direzione)"

Per ogni direzione, il contributo è dato dal prodotto di:
(A)·(D) quanta luce proviene da quella direzione (ambiente di illuminazione)
(B) di questa, quanta ne riceve l'intorno di *x* (legge del coseno)
(C) di questa, quanta ne viene riflessa verso l'osservatore (dal materiale)

26

Equazione di lighting

- ✓ L'equazione della radianza costituisce un'equazione (o modello) di rendering molto accurato
  - ⇒ Il materiale è espresso da una BRDF e può essere molto accurato
  - ⇒ Es. BRDF catturati dal vivo oppure computati da funzioni anche complesse
- ✓ E' ottima per un rendering offline.
- ✓ Tuttavia, è troppo onerosa per un rendering reali time
- ✓ Vediamo alcune drastiche semplificazioni possibili

28

Semplificazione N 1: ambiente di luce discreto (e semplificato)

- ✓ Invece di $L_i(x, \vec{\omega}_{incidente})$
- ✓ Ipotizziamo:
  - ⇒ ogni punto del modello riceve la *stessa* luce
    - (x sparisce dall'equazione)
  - ⇒ Arriva luce >0 <u>solo</u> da un piccolo numero N discreto di direzioni $\vec{\omega}_0, \vec{\omega}_1, \ldots, \vec{\omega}_{N-1}$
    - anche 1 sola (cioè $N = 1$)
    - dalle altre dir, non arriva alcuna luce
    - l'integrale diventa una (piccola) sommatoria (su N)
    - un addendo per ogni luce considerata (anche solo 1)

29

Semplificazione N 1: ambiente di luce discreto (e semplificato)

- ✓ Da: integrale (su tutte le dir ingresso luci continue)

$$\int_{\vec{\omega}_i \in \Omega} \ldots \cdot L_i(x, \vec{\omega}_i) \cdot \ldots \, d\vec{\omega}_i$$

- ✓ a: sommatoria (di poche luci discrete, o anche 1 !)

$$\sum_{i=0}^{N-1} \ldots \cdot L_i \cdot \ldots$$

intensità (costante) della luce i-esima

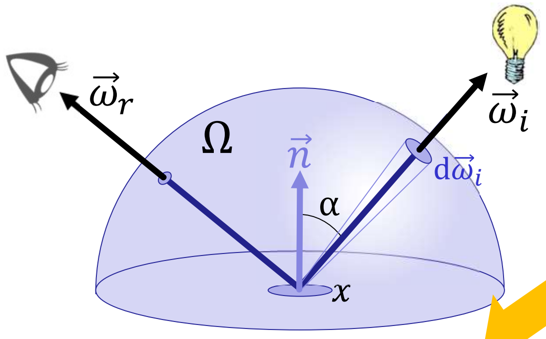
- ✓ Per luci colorate, valori di intensità luce per r,g,b:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \ldots \cdot \begin{pmatrix} L_i^R \\ L_i^G \\ L_i^B \end{pmatrix} \cdot \ldots$$

intensità e *colore* (costanti) della luce i-esima

30

Lighting locale più in generale possibile: l'equazione della radianza



intensità e colore (costanti!) della luce i-esima

direzione di arrivo (incidente) della luce i-esima

$$L_r(x, \vec{\omega}_r) = \sum_{i=0}^{N-1} f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) \begin{pmatrix} L_i^R \\ L_i^G \\ L_i^B \end{pmatrix} (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})$$

31

Semplificazione N 2 : materiale più semplice possibile

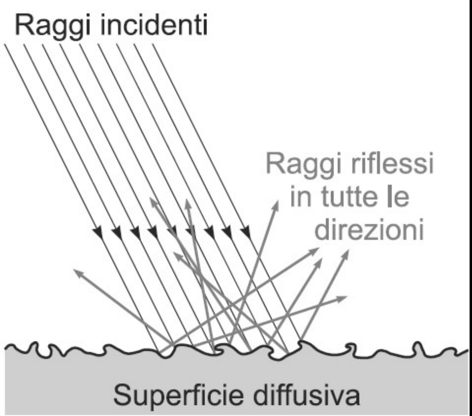
- ✓ BRDF *constante*
  - ⇒non dipende da dir di arrivo della luce
  - ⇒non dipende da dir di osservazione (è «view-independent»)
- ✓ Metafora: tennista completamente caotico
  - ⇒rimbalza i fotoni in una direzione (statisticamente) a caso, indipendentemente dalla dir di arrivo
- ✓ Esistono materiali reali che si comportano davvero così?
  - ⇒Sì: es. gesso e plastica ruvida
  - ⇒Materiali completamente opachi, non lucidi, senza riflessi
  - ⇒Detti: materiali «(puramente) diffusivi» o «(puramente) Lambertiani»

opaco in [ita] significa anche "non trasparente".
In [eng]:
dull = not shiny (not glossy)
opaque = not trasparent

32

Semplificazione N 2 : materiale più semplice possibile («lambertiano»)

- ✓ Succede quando…
  - ⇒a livello microscopico... la superficie presenta micro-sfaccettature disposte in modo caotico
- ✓ Nota:
  - ⇒le BRDF dei materiali conseguono dalle configurazioni microscopiche (e, dalle loro proprietà elettromagnetiche)



33

Semplificazione N 2 : materiale più semplice possibile («lambertiano»)

- ✓ Da funzione (della direz di ingresso e di uscita della luce)

$$\sum_{i=0}^{N-1} \ldots \cdot f_r(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) \cdot \ldots$$

- ✓ a costante, detta albedo

$$\sum_{i=0}^{N-1} \ldots \cdot B_x \cdot \ldots$$

albedo (del punto x): rapporto fra luce incidente e luce riflessa (da x).

- ✓ Per meteriali colorati, 3 costanti, per R,G,B rispett.:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \ldots \cdot \begin{pmatrix} D_x^R \\ D_x^G \\ D_x^B \end{pmatrix} \cdot \ldots$$

base color o **diffusive color** (del punto x)

34

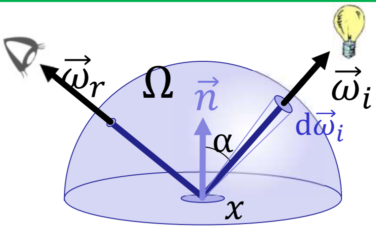
Albedo e base color

- ✓ Un materiale puramente diffusivo (o Labertiano) è descritto da un unico parametro
  - ⇒ Albedo – se non ci interessano i colori
  - ⇒ Base Color (o diffuse color) – per rendering a colori
- ✓ Il Diffuse Color è la risposta intuitiva alla domanda « di che colore è questo materiale »
  - ⇒ Confronta: «di che colore lo percepisco», che dipende dalle condizioni di luce, dalle normali, etc. «*Di notte tutti i gatti sono bigi* »
- ✓ Come tutti i parametri che definiscono i materiali, albedo / base color possono essere: costanti per oggetto, attributi, varying…

35

Risultato di tutte le semplicazioni viste: una semplice *Lighting equation*

nota, i tre «pallini» che appaiono nell'equazione rappresentano prodotti diversi! **quali?**



diffuse, (prodotto dot) il fattore che da solo determina il "chiaroscuro" in questo modello di lighting

sommatoria su tutte le luci (discrete)

$$L_r = \sum_{i=0}^{N-1} \begin{pmatrix} D_x^R \\ D_x^G \\ D_x^B \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_i^R \\ L_i^G \\ L_i^B \end{pmatrix} \cdot (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n})$$

Light color: di che colore è la luce i-esima (e di quale intensità)

«di che colore lo percepisco» (risultato del lighting)

base color - «di che colore è» (materiale, uno degli input del lighting)

36