Urychlovací metody pro Ray-tracing

CGG MFF UK Praha

pepca@cgg.mff.cuni.cz

http://cgg.mff.cuni.cz/~pepca/

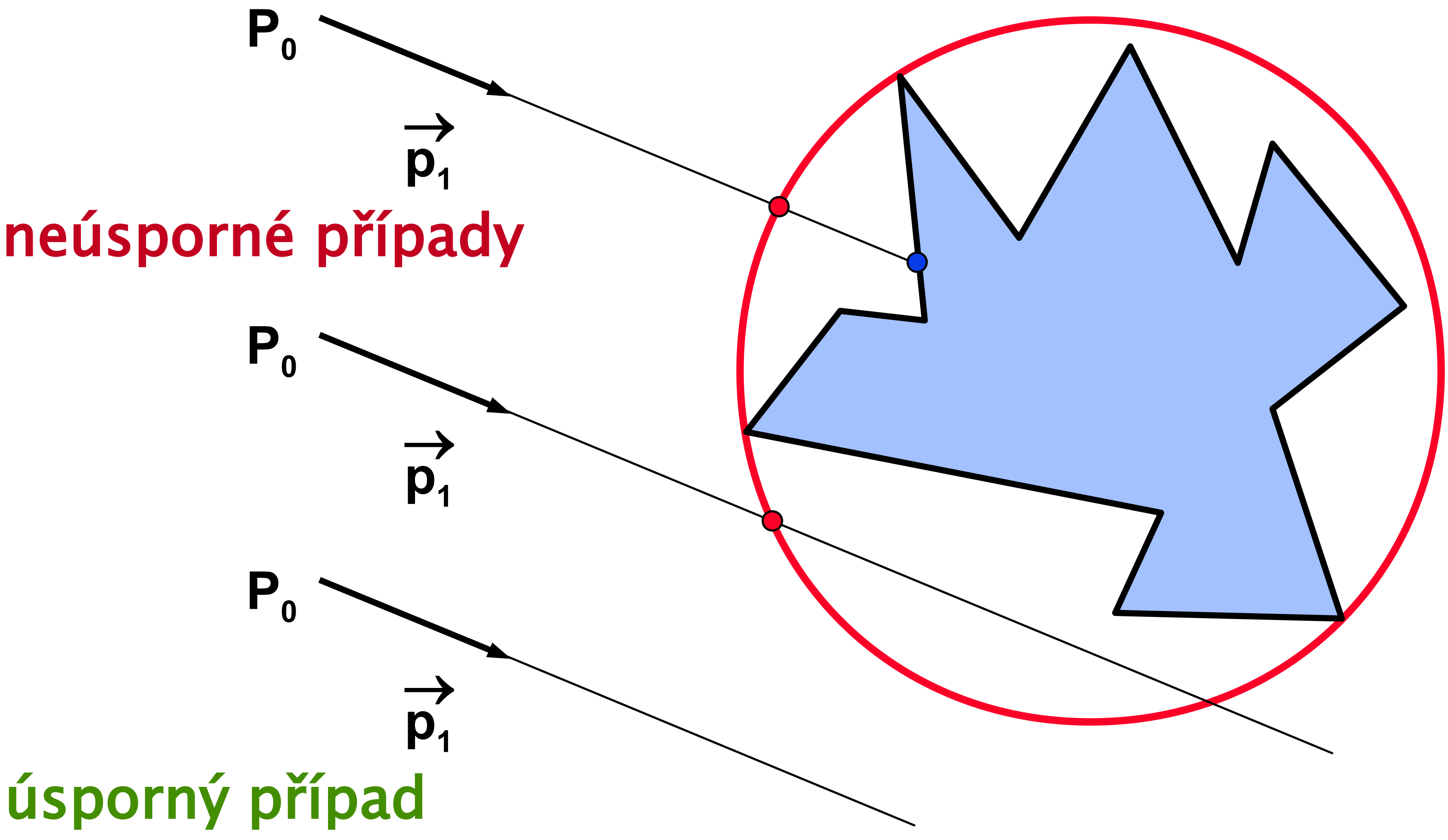
Průsečík paprsku s 3D scénou

- spotřebuje **většinu strojového času** (až 95% podle Whitteda, 1980)
- scéna je složena z **elementárních těles**
  - koule, kvádr, válec, kužel, jehlan, polygon, ..
  - elementární tělesa v CSG
  - počet elementárních těles .. **N**
- klasický algoritmus testuje **každý paprsek** (do hloubky rekurze **H**) s **každým element. tělesem**
  - **O(N)** testů pro jeden paprsek

Klasifikace urychlovacích metod

- ❶ urychlení výpočtu **„paprsek × scéna“**
  - ➨ urychlení testu **„paprsek × těleso”**
    - » obalová tělesa, efektivní algoritmy výpočtu průsečíků
  - ➨ menší počet testů **„paprsek × těleso”**
    - » hierarchie obalových těles, dělení prostoru (prostorové adresáře), směrové techniky (+2D adresáře)
- ❷ menší **počet testovaných paprsků**
    - » dynamické řízení rekurze, adaptivní vyhlazování
- ❸ **zobecněné paprsky** (dávající více informace)
    - » polygonální svazek paprsků, kužel, ..

Obalové těleso



Obalové těleso

- ❶ výpočet průsečíku je **jednodušší** než u původního tělesa
  - koule, kvádr v obecné nebo osově rovnoběžné poloze, průnik pásů, ..
- ❷ obal by měl **co nejtěsněji obklopovat** původní těleso (pro maximální urychlení)
- **efektivita** obalového tělesa záleží na vhodném kompromisu mezi ❶ a ❷
  - celková asymptotická složitost zůstává **O(N)**

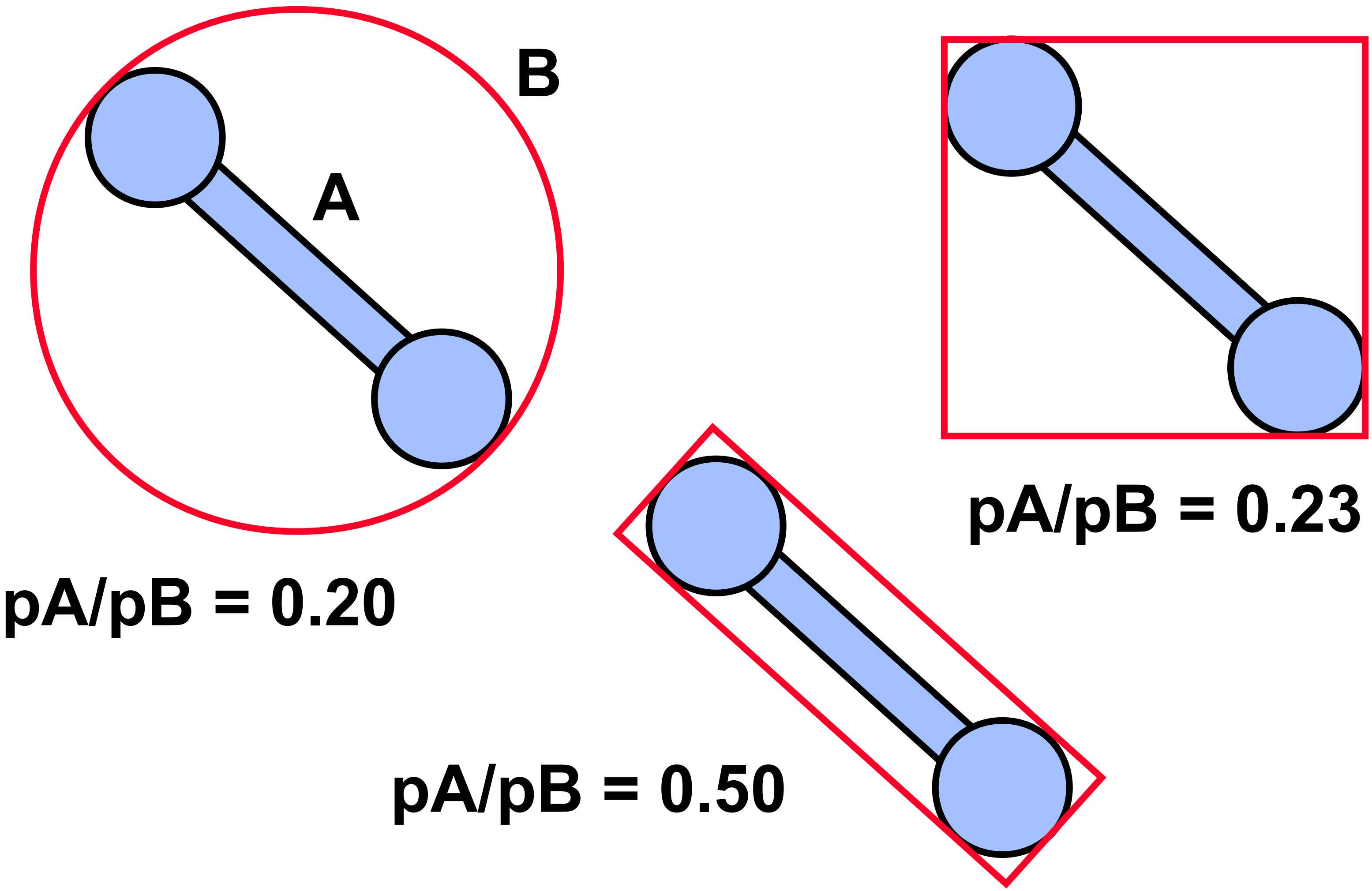
Efektivita obalového tělesa

Očekávaný **průměrný čas výpočtu** průsečíku paprsku s tělesem:

$$\underline{\mathbf{B} + \mathbf{p} \cdot \mathbf{I}} \quad < \quad \mathbf{I}$$

- **I** .. čas výpočtu průsečíku s **původním tělesem**
- **B** .. čas výpočtu průsečíku s **obalovým tělesem**
- **p** .. **pravděpodobnost zásahu** obalového tělesa paprskem (kolik procent paprsků protne obalové těleso)

Různě efektivní obaly



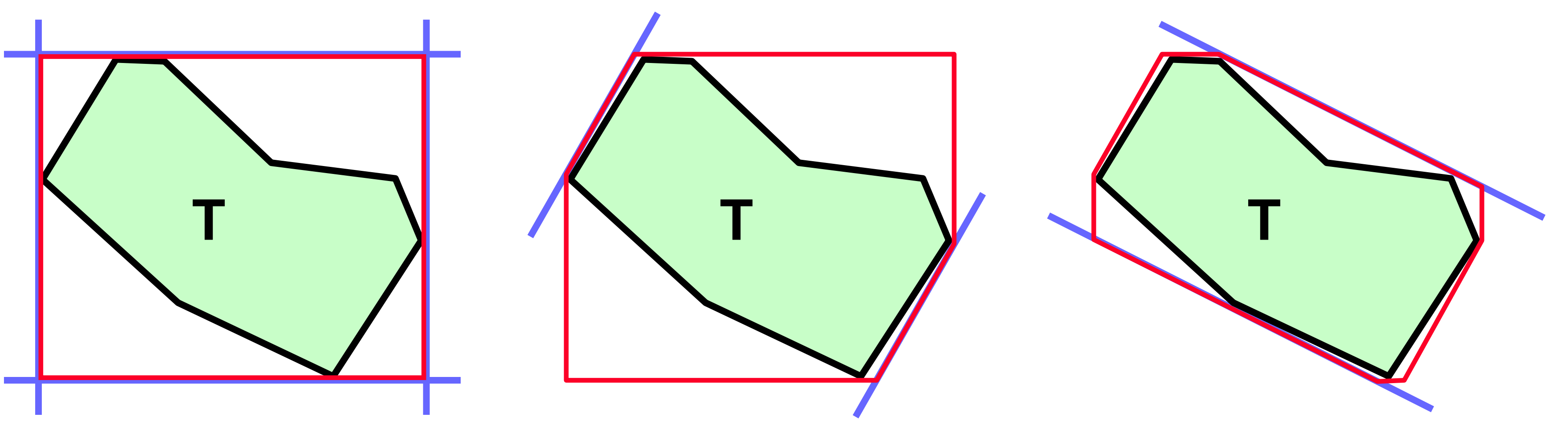
Kombinovaná obalová tělesa

- **lepší aproximace tvaru** původního tělesa
- **sjednocení a průniky** jednodušších obalových těles:

Aproximace konvexního obalu

- výhodné obalové těleso pro **konvexní objekty**
- průnik několika **pásů** („k-dops”)
  - pás je omezen dvěma rovnoběžnými rovinami
  - nutnost efektivního výpočtu konstant **d** a **D**:

$$\mathbf{d} = \min_{[x,y,z]\in T}\{ax + by + cz\}, \quad \mathbf{D} = \max_{[x,y,z]\in T}\{ax + by + cz\}$$

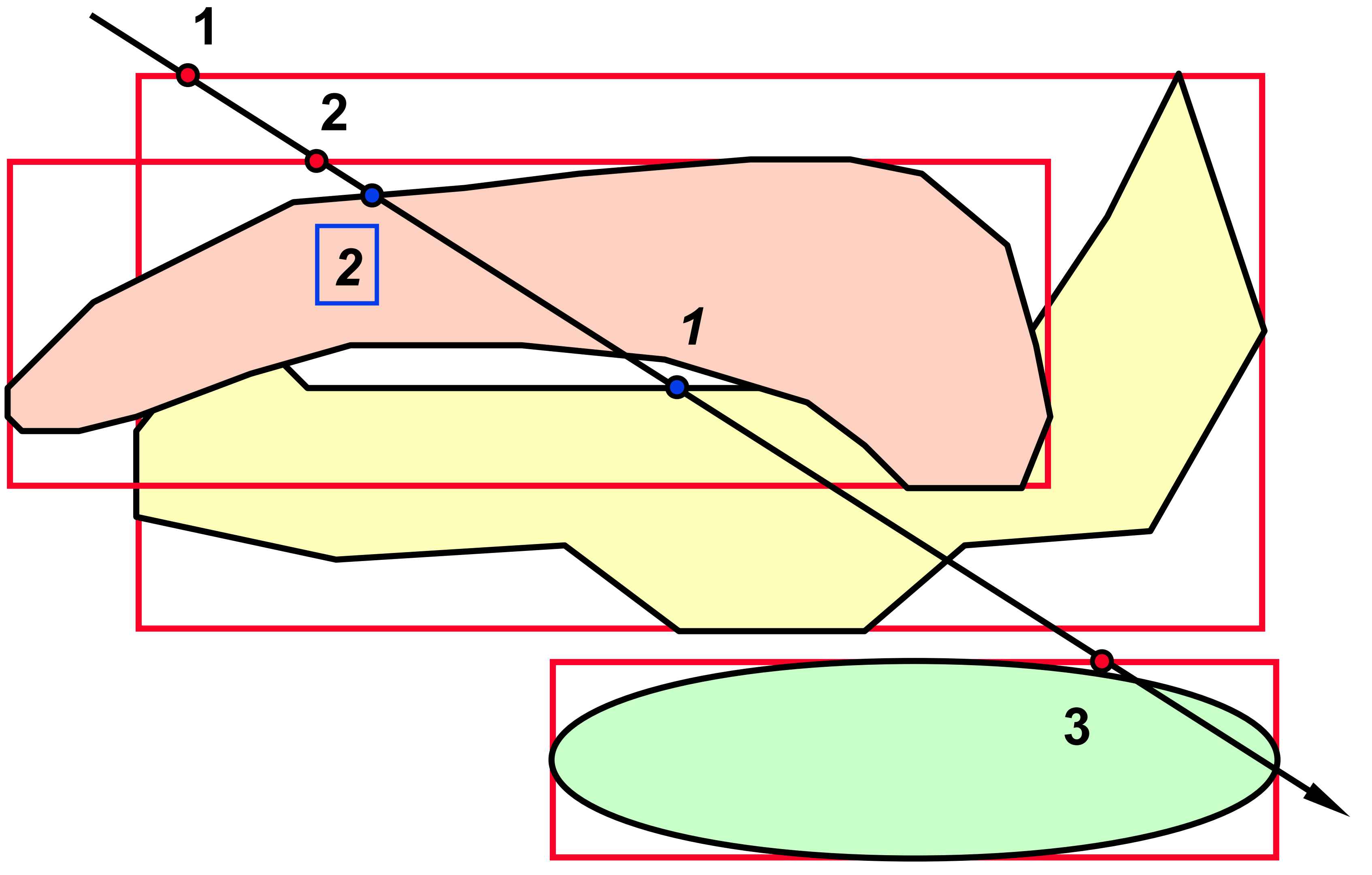


Efektivní implementace

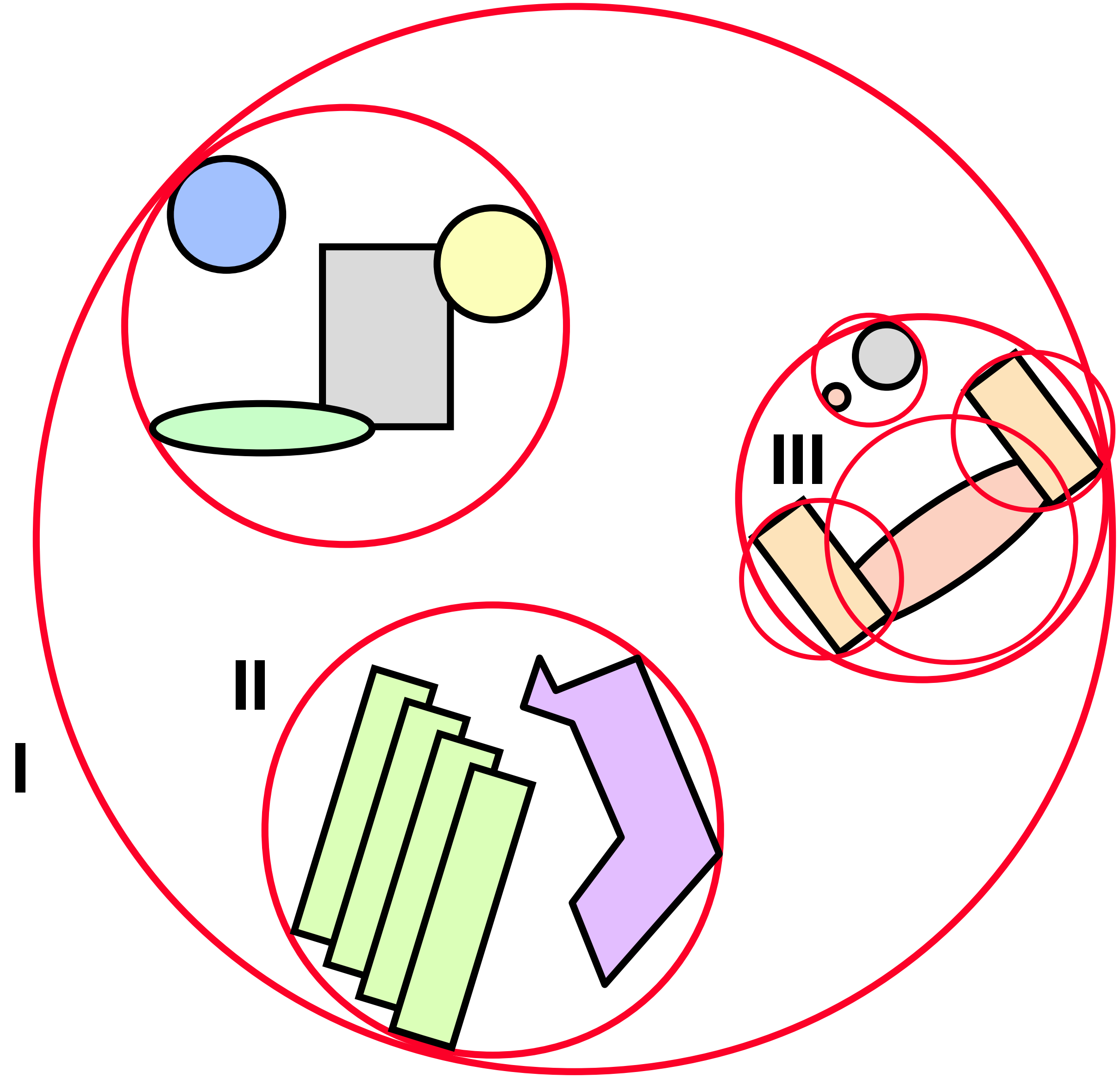
- ❶ výpočítám průsečíky paprsku se **všemi obalovými tělesy**
- ❷ protnutá obalová tělesa seřadím podle **vzdálenosti od počátku paprsku**
- ❸ objekty testuji v tomto pořadí (od nejbližších ke vzdálenějším)

- ➡ skončím, jestliže jsem **našel průsečík** a otestoval všechny objekty sahající před něj

Efektivní implementace



Hierarchie obalových těles (BVH)



Hierarchie obalových těles

- v ideálním případě **snižuje asymptotickou složitost** na **O(log N)**
- vyplatí se zejména u **dobře strukturovaných scén**
  – množství dobře oddělených malých objektů
  – přirozená implementace v CSG reprezentaci (prořezávání CSG stromu)
- možnost **automatické konstrukce** hierarchie
  – inkrementální algoritmus
- v orientaci „AABB“ je to přesně **R-tree** (Guttman, 1984)
  – viz databázové vyhledávací datové struktury

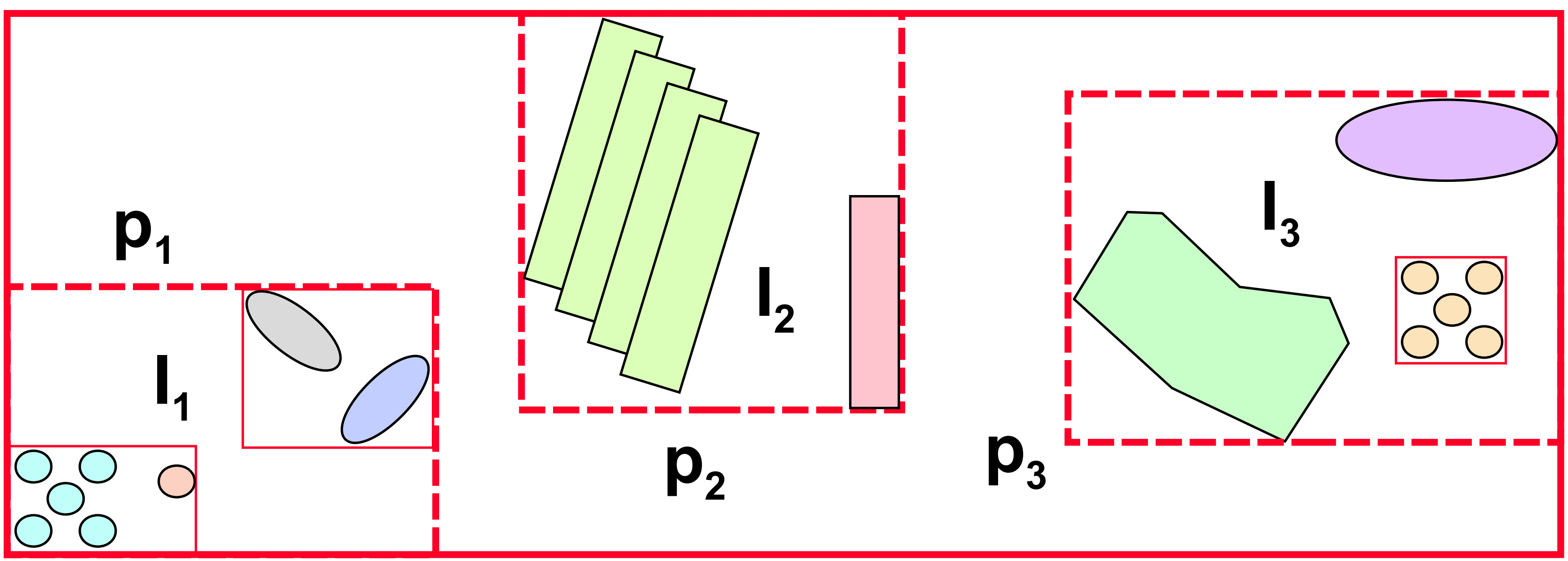
Efektivita hierarchie

$$K \cdot B + \sum_{i=1}^{K} p_i\, I_i \overset{?}{<} \sum_{i=1}^{K} I_i$$

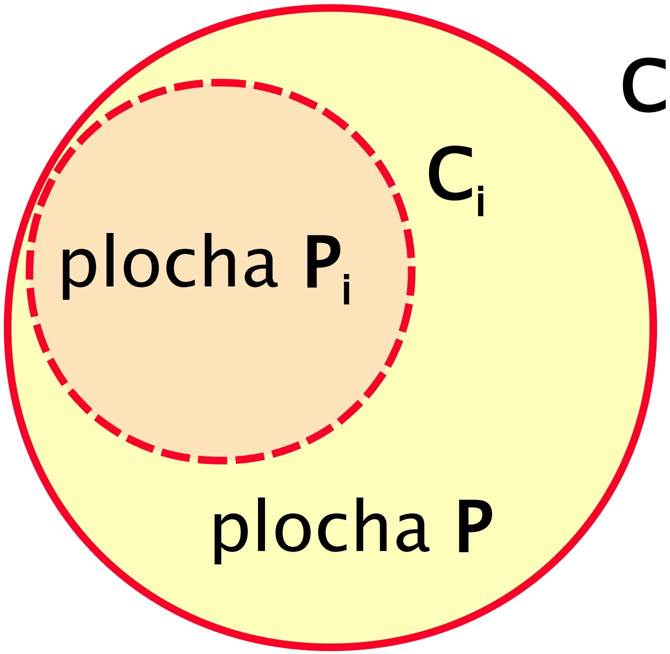
B .. čas výpočtu průsečíku s obalovým tělesem

p_i .. pravděpodobnost zásahu i-tého obalového tělesa

I_i .. čas výpočtu pro objekty uzavřené v i-tém obalovém tělese



Efektivita hierarchie



P(d), P_i**(d)** .. plocha průmětu tělesa ze směru **d**

S, S_i .. povrch tělesa

Pro jeden směr pohledu **d**:

$$p_i = Pr\left(zásah\, C_i \mid zásah\, C \right) = \frac{P_i(d)}{P(d)}$$

Pro všechny směry a **konvexní tělesa**:

$$p_i = \frac{\int P_i(d)\ dd}{\int P(d)\ dd} = \frac{S_i}{S}$$

Inkrementální konstrukce

❶ vytvořím **prázdnou hierarchii** (kořen stromu)

❷ vezmu nový objekt a **přidám ho do kořene**
– opravím obalové těleso kořene

❸ vyberu **nejvýhodnější možnost** (v rámci obal.t.):
– objekt bude samostatný (bez vlastního obalu)
– objekt bude mít sám nové obalové podtěleso
– objekt přidám do existujícího obalového podtělesa

➡ záleží na **pořadí přidávání** objektů !
– setřídění podle 3D polohy a náhodné zamíchání

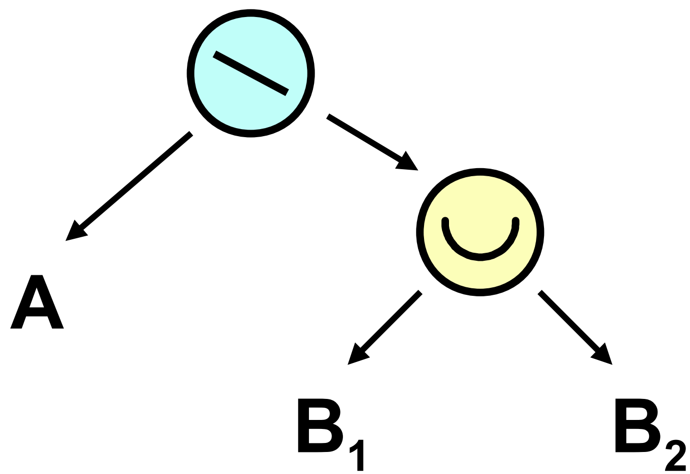
Hierarchické obalové systémy

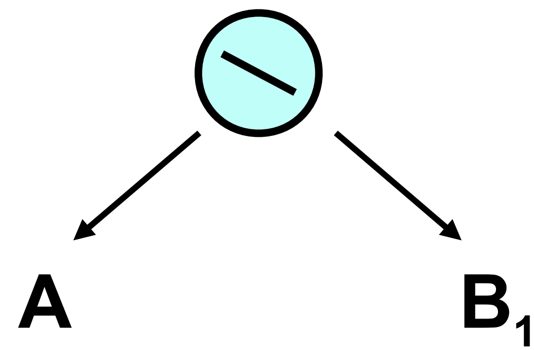
- „**Sphere tree**” (Palmer, Grimsdale, 1995)
  – jednoduchý test i transformace, horší aproximace
- „**AABB tree**”, „**R-tree**“ (Held, Klosowski, Mitchell, '95)
  – jednoduchý test, složitější transformace
- „**OBB tree**” (Gottschalk, Lin, Manocha, 1996)
  – jednoduchá transformace, složitější test, slušná aproximace
- „**K-dop tree**” (Klosowski, Held, Mitchell, 1998)
  – složitější transformace a test, výborná aproximace

„Prořezávání” CSG stromu

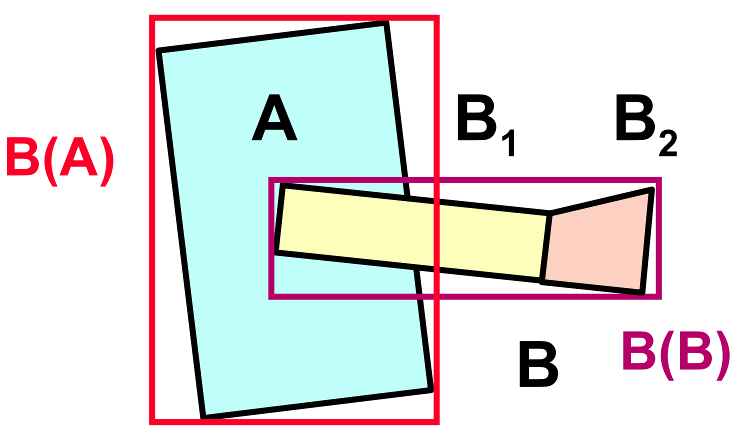
- efektivní především pro **subtraktivní množinové operace** (průnik, rozdíl)
- primární obalová tělesa jsou přiřazena (omezeným) **elementárním tělesům**
  - velikost se většinou určuje analyticky
- obalová tělesa se pomocí množinových operací **propagují směrem ke kořeni**
- u argumentů **subtraktivních operací** se mohou obalová tělesa **zmenšovat**

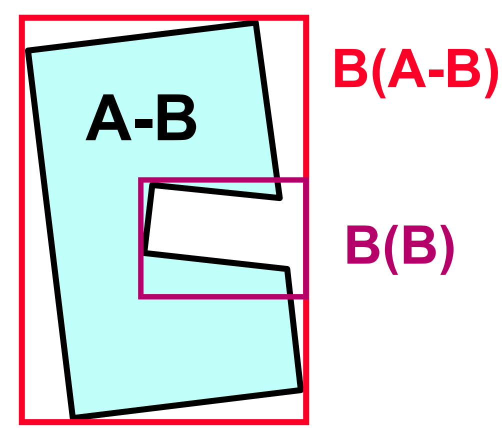
„Prořezávání" CSG stromu





$B(A\text{-}B) \cap B(B_2) = 0$



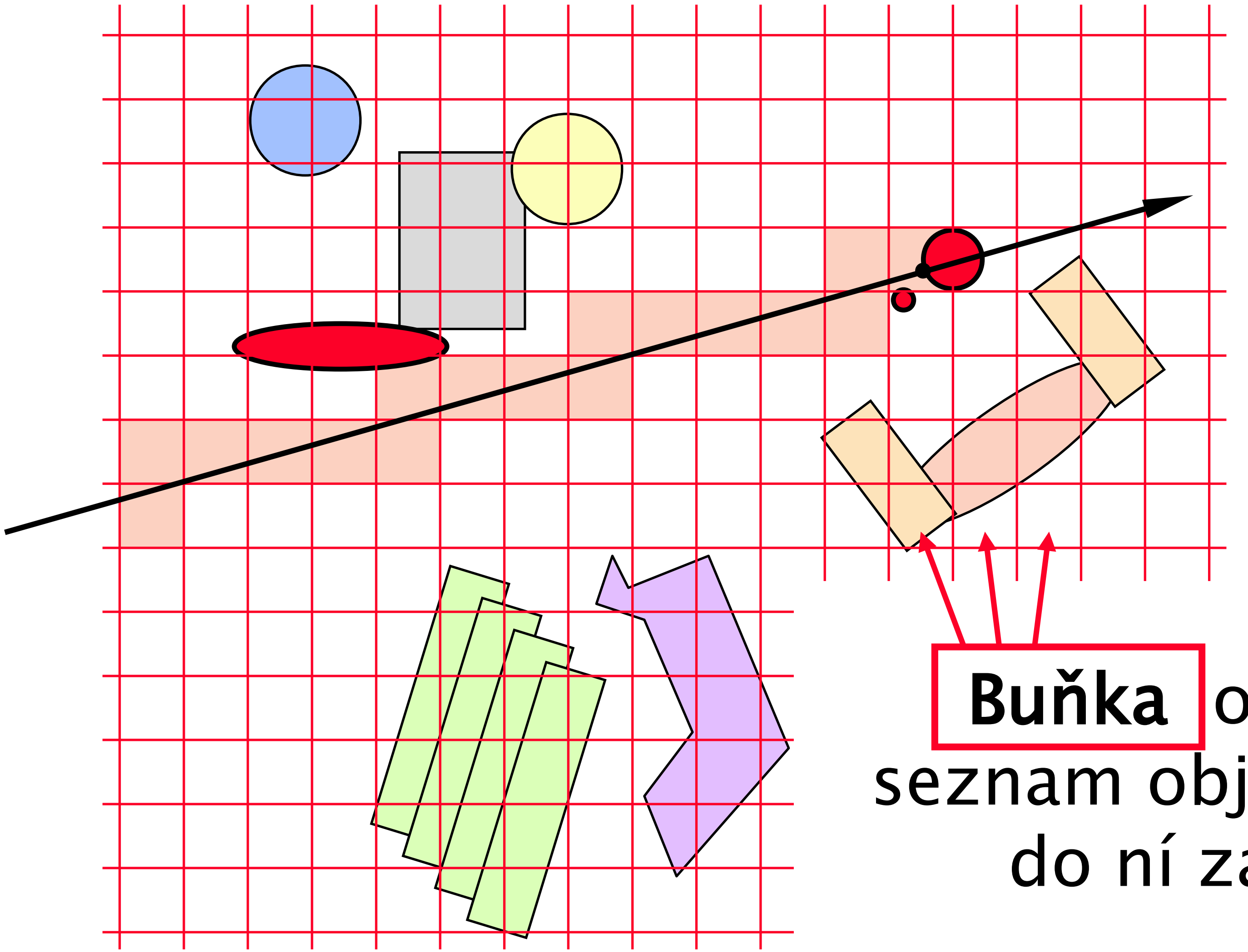


Dělení prostoru (prostorové adresáře)

- **uniformní dělení** (stejně velké buňky)
  - \+ jednoduchý průchod
  - – mnoho kroků výpočtu
  - – velký objem dat

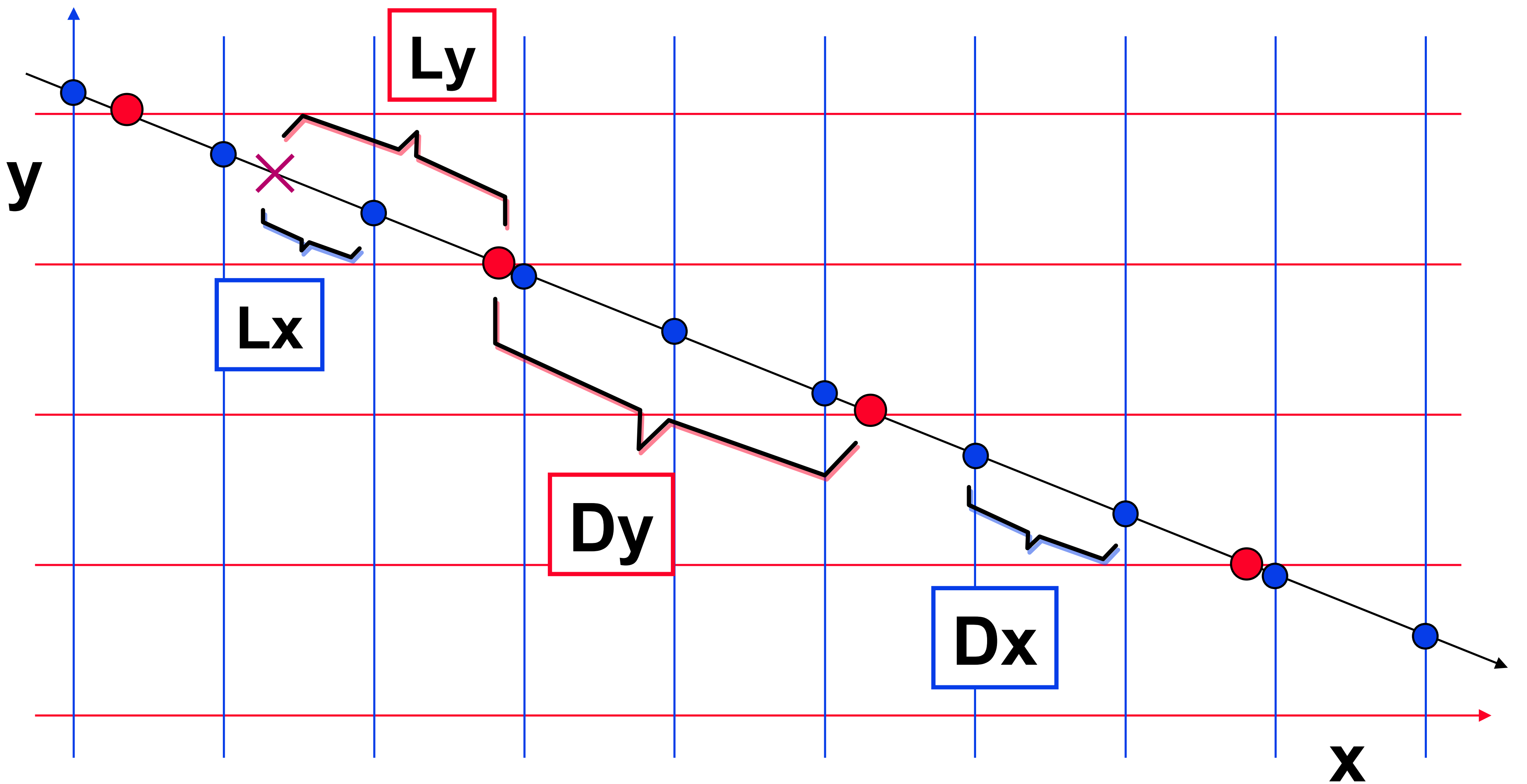
- **neuniformní dělení** (většinou adaptivní)
  - \+ méně kroků výpočtu
  - \+ menší objem dat
  - – složitější implementace datové struktury i algoritmu procházení

Uniformní dělení prostoru (grid)



Buňka obsahuje seznam objektů, které do ní zasahují

Průchod mřížkou (3D DDA)



Průchod sítí buněk (3D DDA)

- **paprsek**: $\mathbf{P_0 + t \cdot \vec{p}_1}$ pro $\mathbf{t > 0}$
- pro daný směr $\vec{\mathbf{p}}_1$ se předem spočítají **konstanty Dx**, **Dy**, **Dz**:
  - vzdálenost mezi sousedními průsečíky paprsku se sítí rovnoběžných rovin (kolmých na osy **x**, **y**, **z**)
- pro bod $\mathbf{P_0}$ se určí **počáteční buňka [i, j, k]** a hodnoty proměnných **t**, **Lx**, **Ly**, **Lz**:
  - parametr polopřímky **t**, vzdálenosti k nejbližším průsečíkům paprsku se stěnami

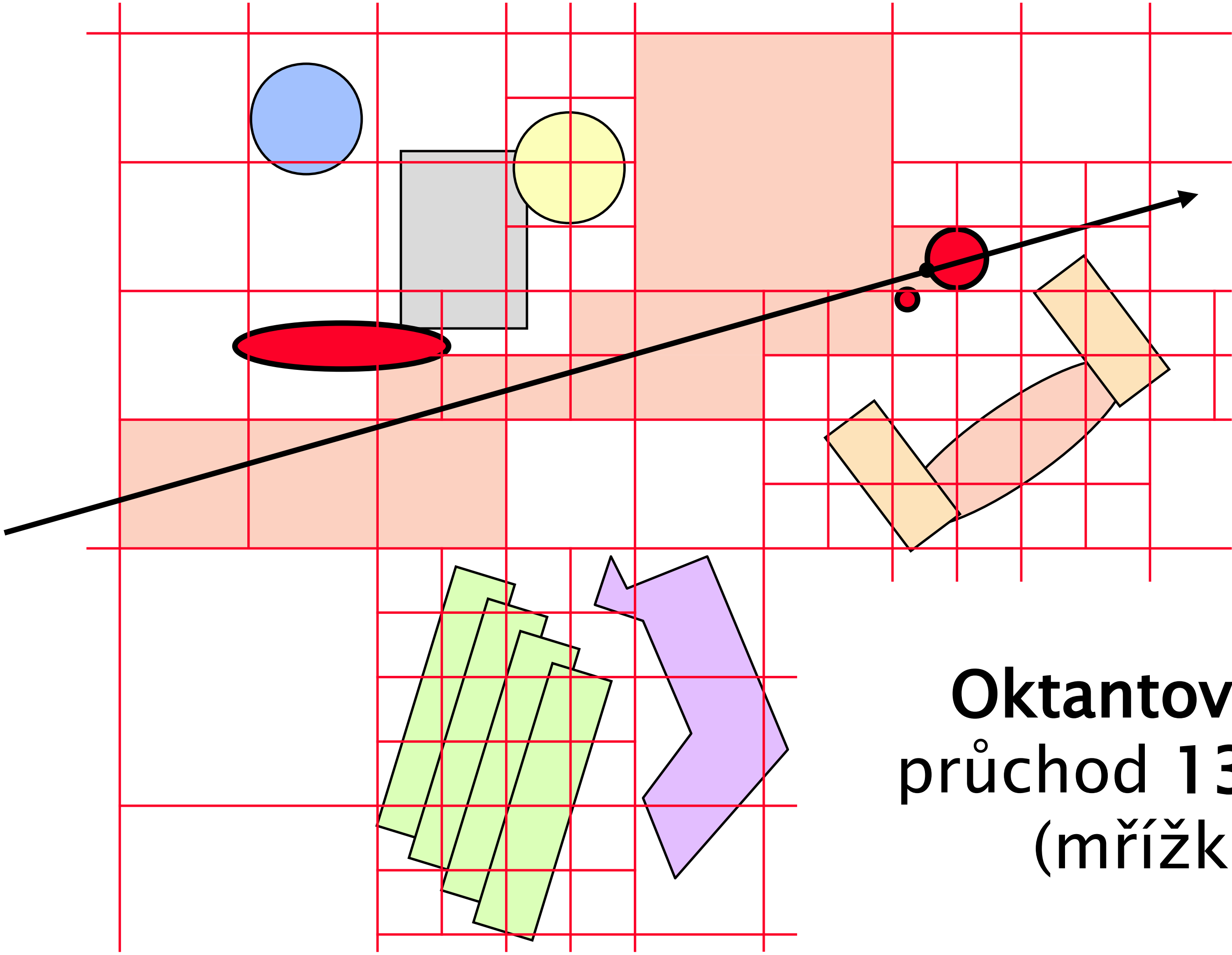
Průchod sítí buněk (3D DDA)

❷ **zpracování buňky** [**i**, **j**, **k**] (výpočet průsečíků)

❸ postup do **sousední buňky**:
- **D = min {Lx,Ly,Lz};** /* předpoklad: **D = Lx** */
- **Lx = Dx; Ly = Ly - D; Lz = Lz - D;**
- **i = i ± 1;** /* podle znaménka $\mathbf{P_{1x}}$ */

❹ **koncové podmínky**:
- našel jsem nejbližší průsečík paprsku se scénou, a ten <u>leží v aktuální buňce</u>
- nová buňka leží mimo oblast scény

Neuniformní dělení prostoru

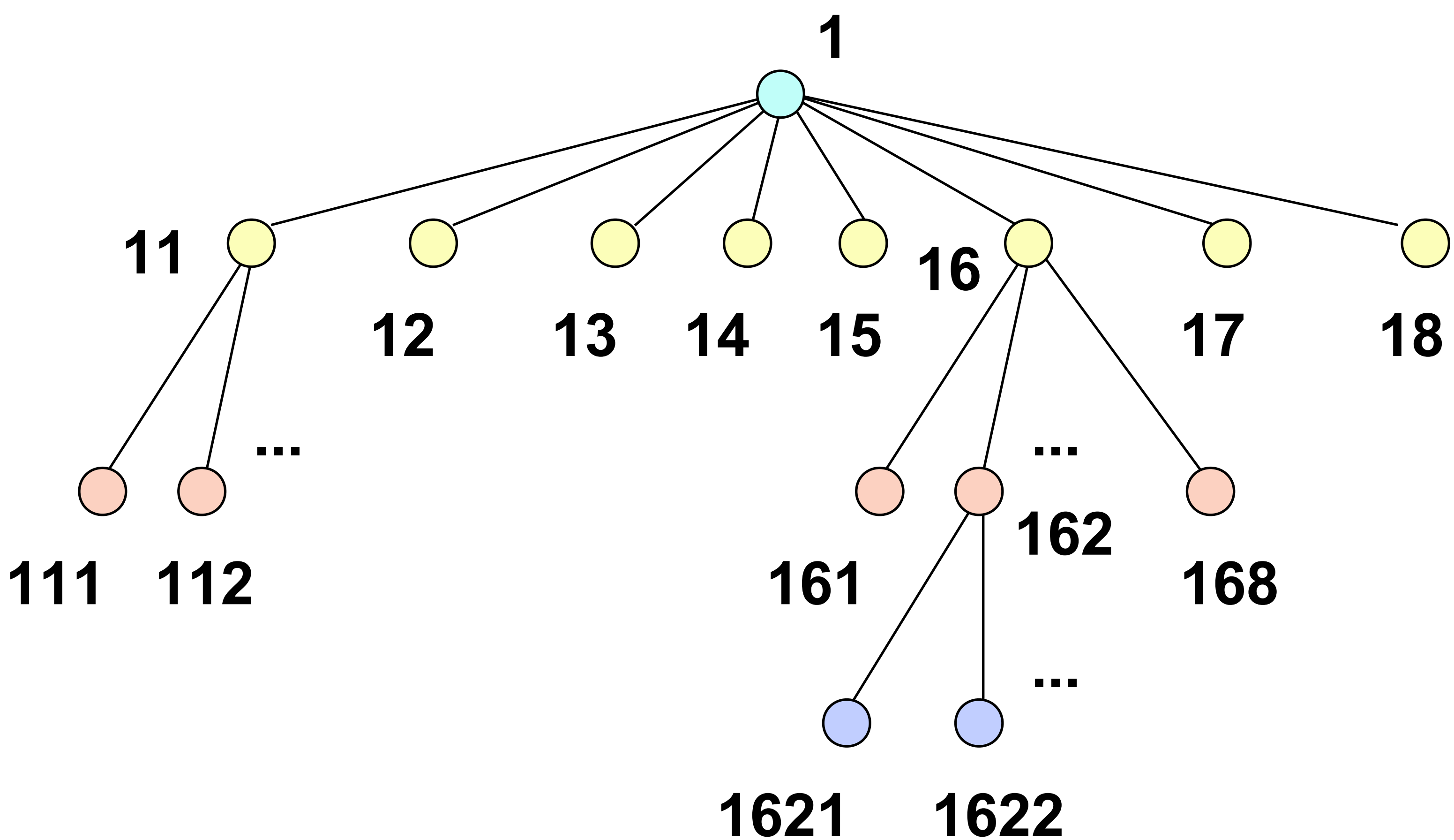


Oktantový strom:
průchod **13 buňkami**
(mřížka: **17**)

Geometrie adaptivního dělení

- **oktantový strom** s půlením stran
  - reprezentace pomocí ukazatelů, <u>implicitní reprezentace</u> nebo hašovací tabulkou (Glassner)
- **KD-strom** (Bentley, 1975) [dříve „osově orientovaný BSP“]
  - buňky se dělí v polovině, cyklicky se střídají směry dělení
  - buňky se dělí adaptivně, i směry dělení jsou adaptivní
- [obecný **BSP strom**]
  - dělicí roviny mají libovolnou orientaci

Oktantový strom podle Glassnera



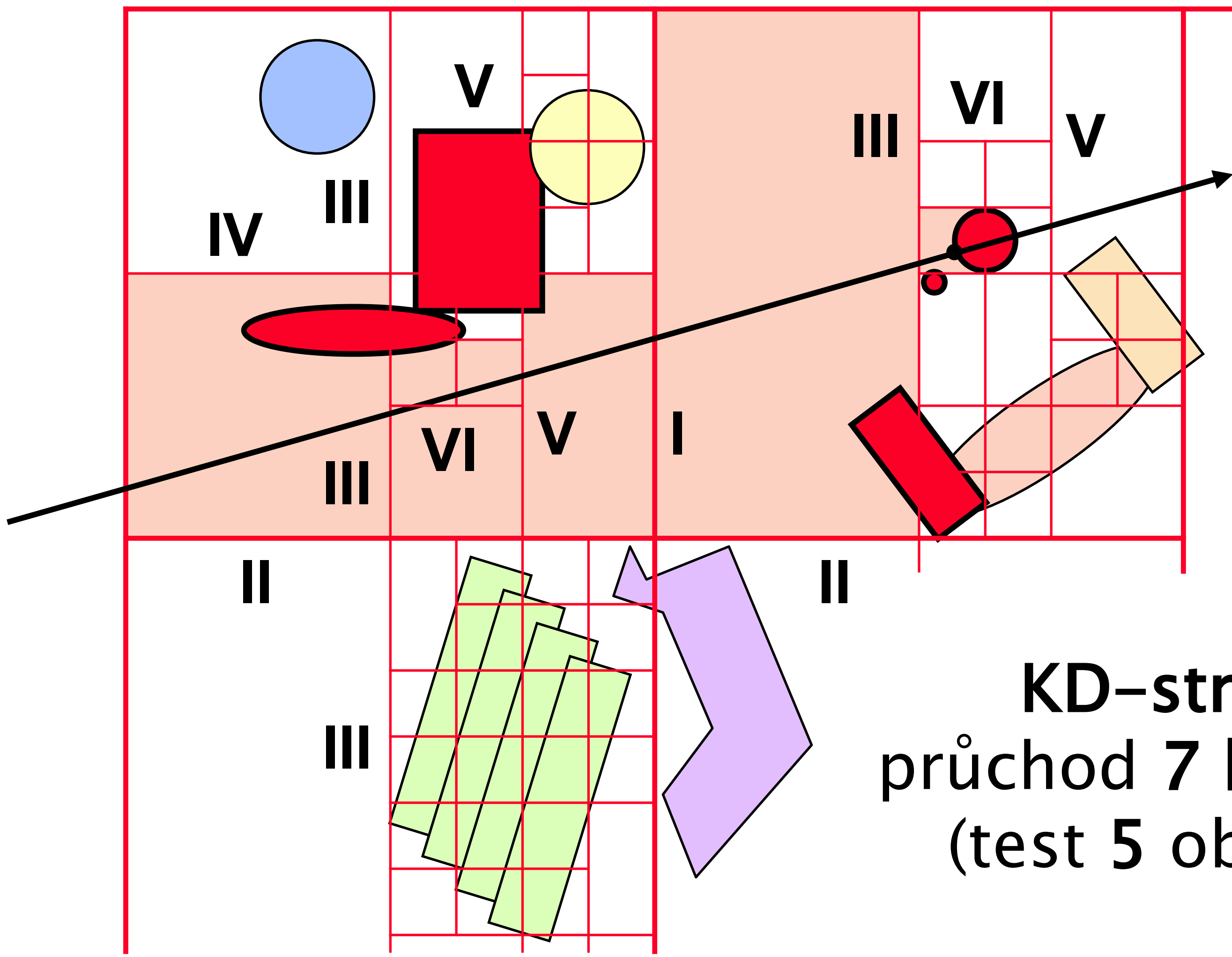
Oktantový strom podle Glassnera

- jednotlivé buňky jsou **hierarchicky očíslovány**
  - kořen .. **1**
  - jeho potomci .. **11** až **18**, .. atd.
  - <u>každý voxel</u> má přiřazen kód bez ohledu na to, zda je listem aktuálního oktantového stromu nebo ne
- skutečné **listy stromu** se ukládají do řídké **hašovací tabulky**
  - příklad hašovací fce: **Kód <u>mod</u> VelikostTabulky**

Průchod stromem (Glassner)

- bod ležící na paprsku .. **[x, y, z]**
  - umím pro něj najít kód voxelu .. **[1 – 8]**^{k}
- při konstrukci kódu hledám v hašovací tabulce všechny **prefixy**
  - nalezený prefix je listem obsahujícím bod **[x, y, z]**
- po zpracování buňky stromu pokračuji **posunutím bodu [x, y, z]** ve směru paprsku (**P**$_1$)
  - pokračuji opět lokalizací nového bodu, ...

KD-strom (statická varianta)



KD-strom:
průchod **7 buňkami**
(test **5** objektů)

Kritéria adaptivního dělení

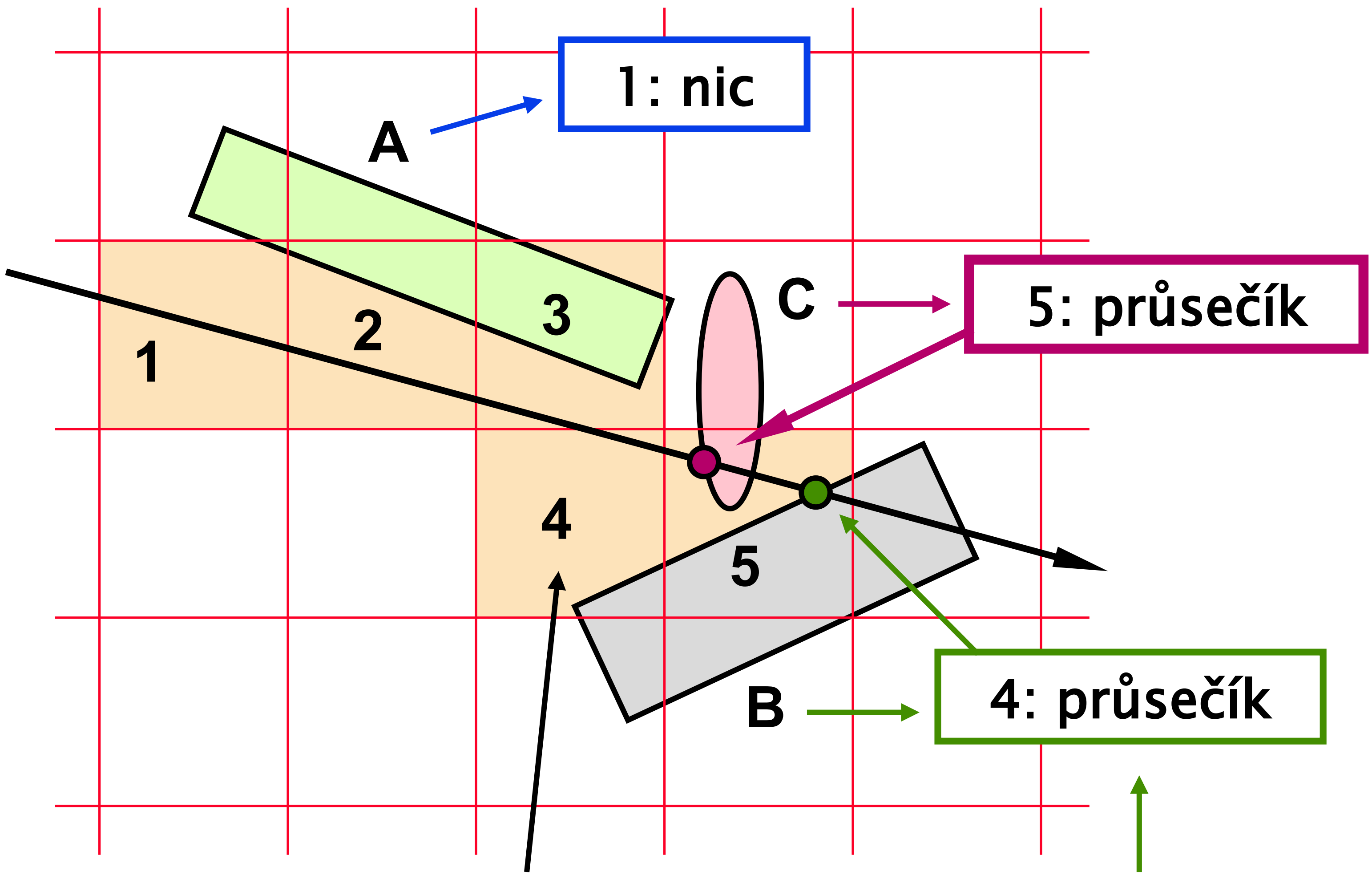
- ❶ omezení **počtu těles** i **hloubky dělení**
  - rozděl buňku, zasahuje-li do ní více než **M těles** (např. **M = 1 .. 5**)
  - **maximální úroveň dělení** je **K** (např. **K = 3 .. 25**)
- ❷ omezení **počtu těles** a **spotřeby paměti**

  místo omezení úrovně dělení:
  - dělení se ukončí při zaplnění **vyhrazeného úseku** paměti
  - při dělení je nutné postupovat **do šířky** (fronta kandidátů na dělení)

Průchod adaptivními strukturami

- posunuji se po paprsku a hledám sousední buňku vždy až **od kořene** (viz Glassnerova metoda)
- **přípravná fáze**: průchod stromem a rozdělení paprsku na intervaly
  - intervaly parametru **t** přiřazené jednotlivým buňkám, kterými budu procházet
- **pomocné údaje** v dat. strukturách (à la „finger tree”)
  - ukazatele na sousední buňky (na stejné úrovni ve stromu)
- rekurzivní **průchod do hloubky** s haldou
  - seznam nejnadějnějších sektorů v haldě

Schránka („mailbox”)

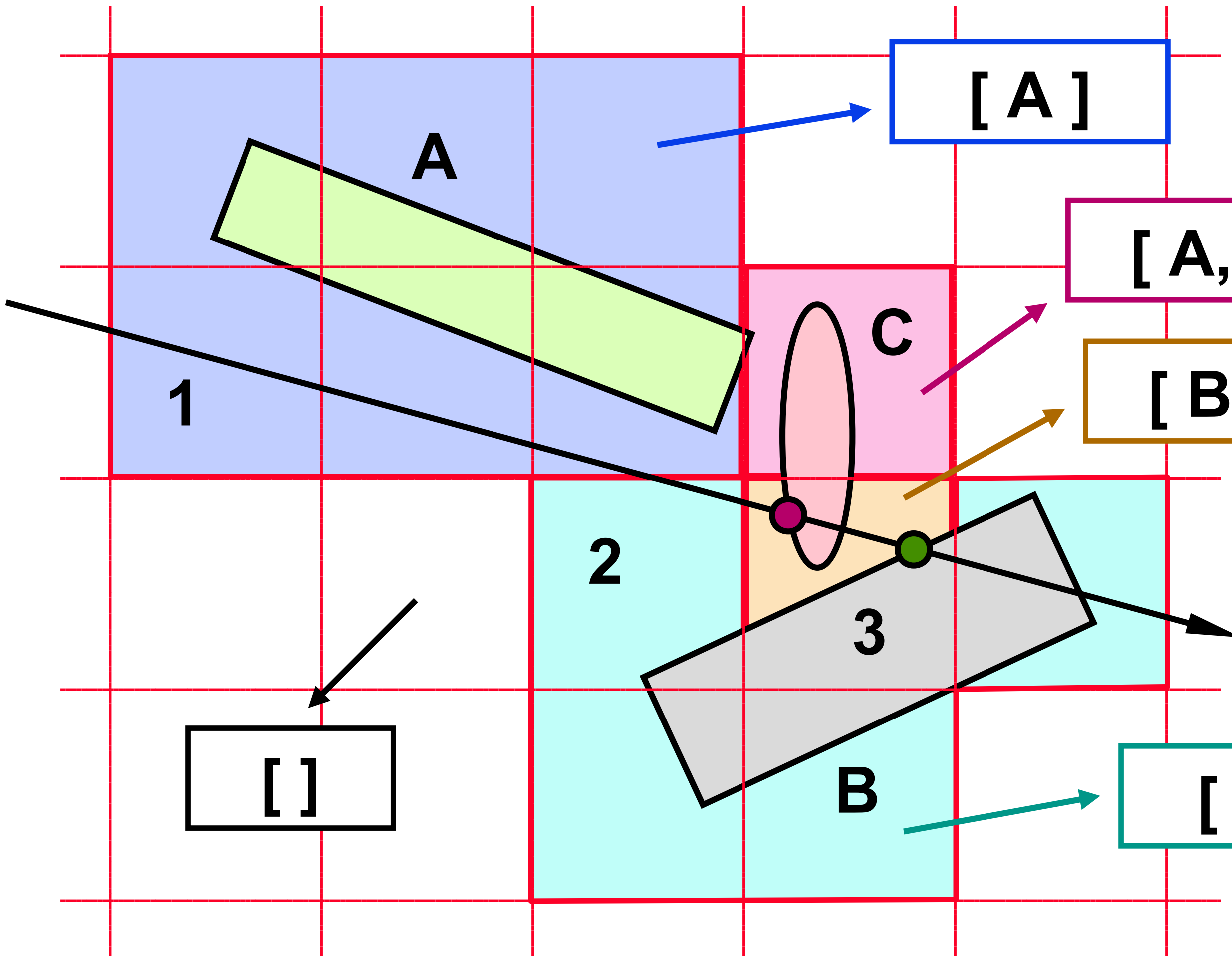


Průsečík musí ležet v aktuální buňce (jinak ho odložím)

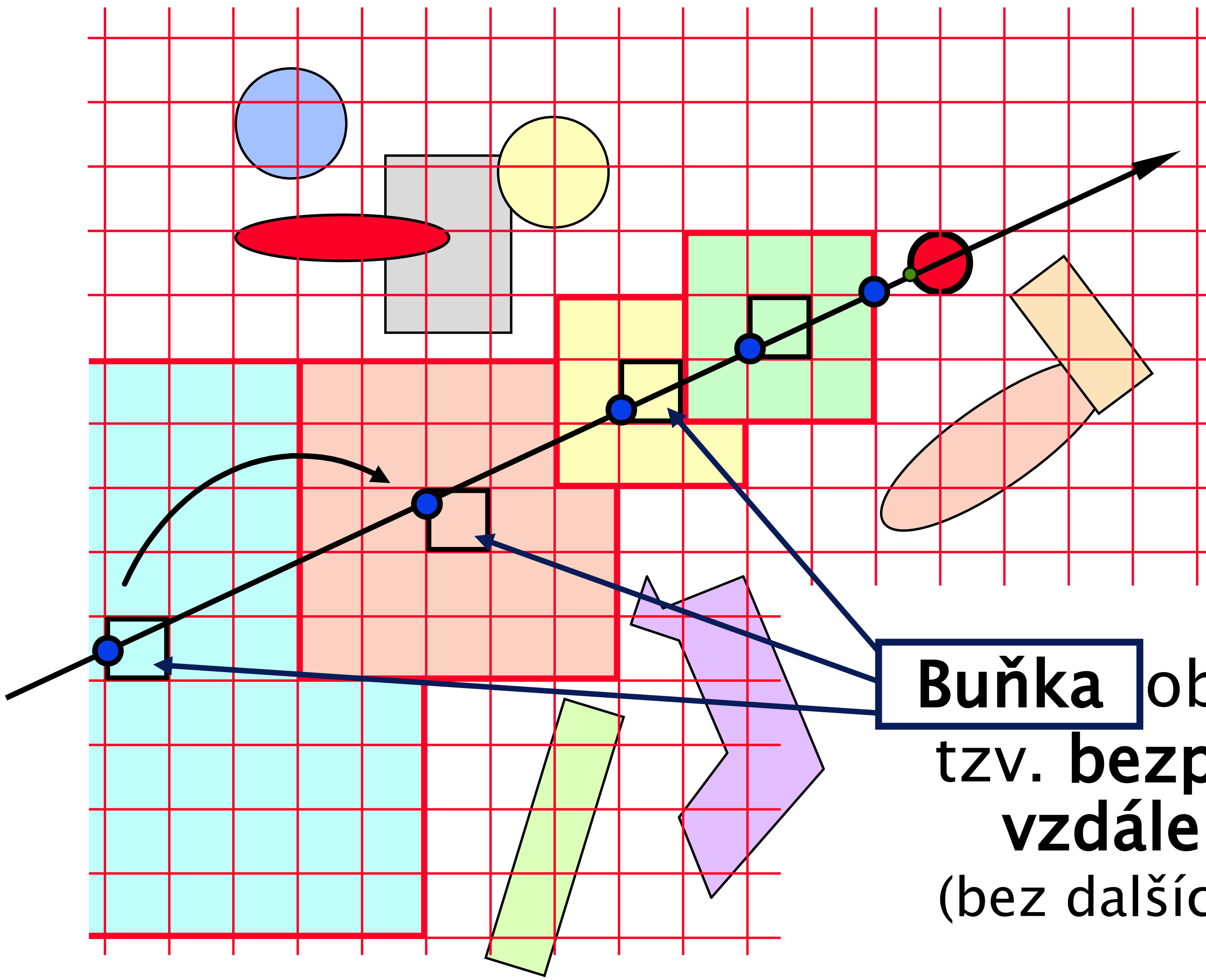
Abstraktní dělení prostoru

- **není třeba testovat** (ani procházet!) seznamy, které jsem již testoval
- seznam musím procházet až v takové buňce, do které zasahuje **jiná** (větší) **množina těles**
- buňky mohou **sdílet shodné seznamy těles**
  - otestované seznamy **označuji** zvláštním příznakem
  - procházím pouze **neoznačené** seznamy
  - na úrovni těles používám techniku **schránek**

Abstraktní dělení prostoru



Makrobuňky (M. Šrámek)

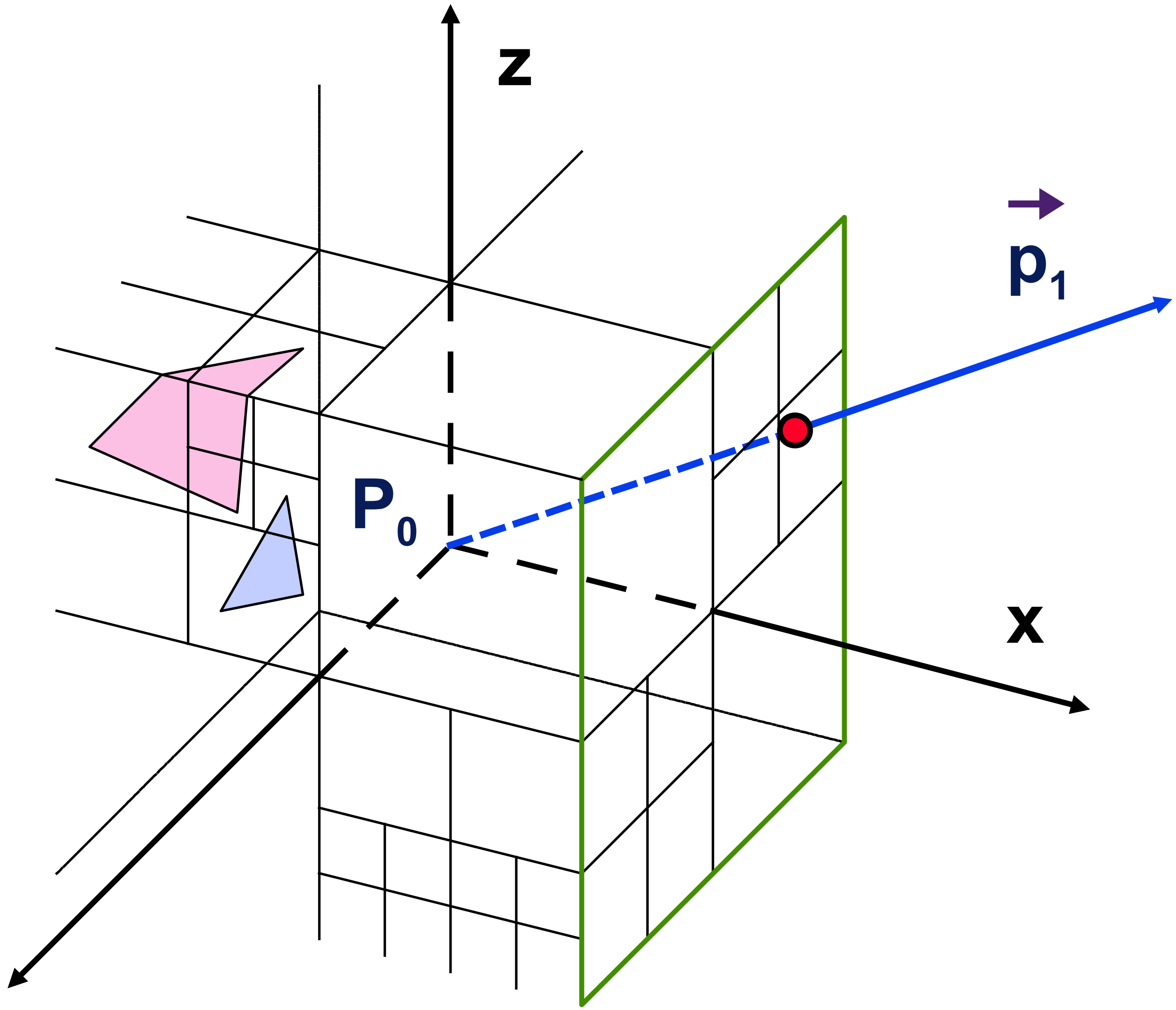


Buňka obsahuje tzv. **bezpečnou vzdálenost** (bez dalších těles)

Směrové urychlovací techniky

- metody využívající **směrové krychle**:
  - **světelný buffer**
    – urychluje stínovací paprsky k bodovým zdrojům
  - **koherence paprsků**
    – urychluje všechny sekundární paprsky
- 5D **klasifikace paprsků**
- **adresář v průmětně** (předvýpočet viditelnosti)
  – urychluje pouze primární paprsky

Směrová krychle (adaptivní síť)



Směrová krychle

- **orientována** rovnoběžně s osami **x**, **y**, **z**
- jednotlivé stěny jsou rozděleny na **buňky**
  – uniformní nebo adaptivní dělení
  – každá buňka obsahuje seznam relevantních objektů (mohou být navíc setříděny vzestupně podle vzdálenosti od středu krychle)

➡ při uniformním dělení lze pro urychlení využít **HW výpočtu viditelnosti** (z-buffer)

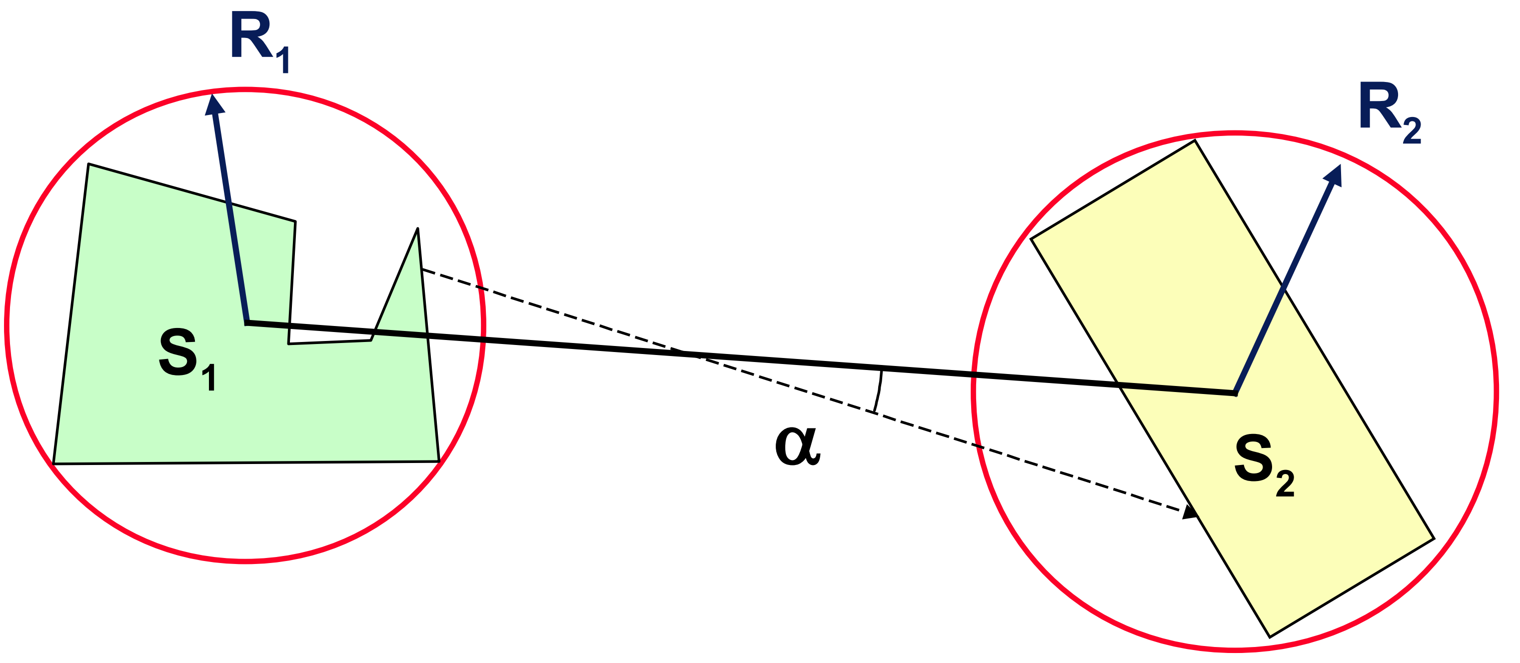
Světelný buffer

- urychluje stínovací paprsky k **bodovým světelným zdrojům**

- do každého zdroje umístím **směrovou krychli**
  - spočítám potenciální viditelnost jednotlivých těles z místa světelného zdroje
  - některé buňky mohou být zcela zakryty 1 tělesem

- při **výpočtu stínovacího paprsku** beru v úvahu jen tělesa zaznamenaná v buňce směrové krychle pro příslušný směr

Koherence paprsků



$$\cos\alpha \geq \sqrt{1 - \frac{R_1 + R_2}{\left\| S_1 - S_2 \right\|}}$$

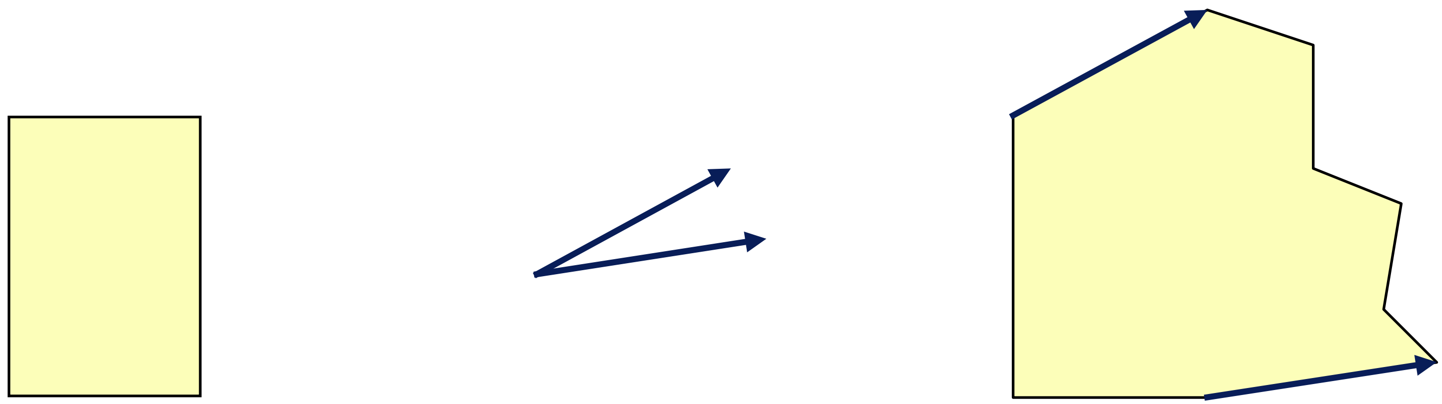
Urychlovací algoritmus

- urychluje všechny **sekundární paprsky**
  – odražené, zalomené, stínovací
- předpokládám obalová tělesa tvaru **koule**
- ➡ směrové krychle umístím do **středu** každého **obalového tělesa**
  – v každé buňce krychle spočítám seznam zasahujících objektů a světelných zdrojů (s využitím koherenční nerovnosti)
  – seznamy mohou být setříděné podle vzdálenosti

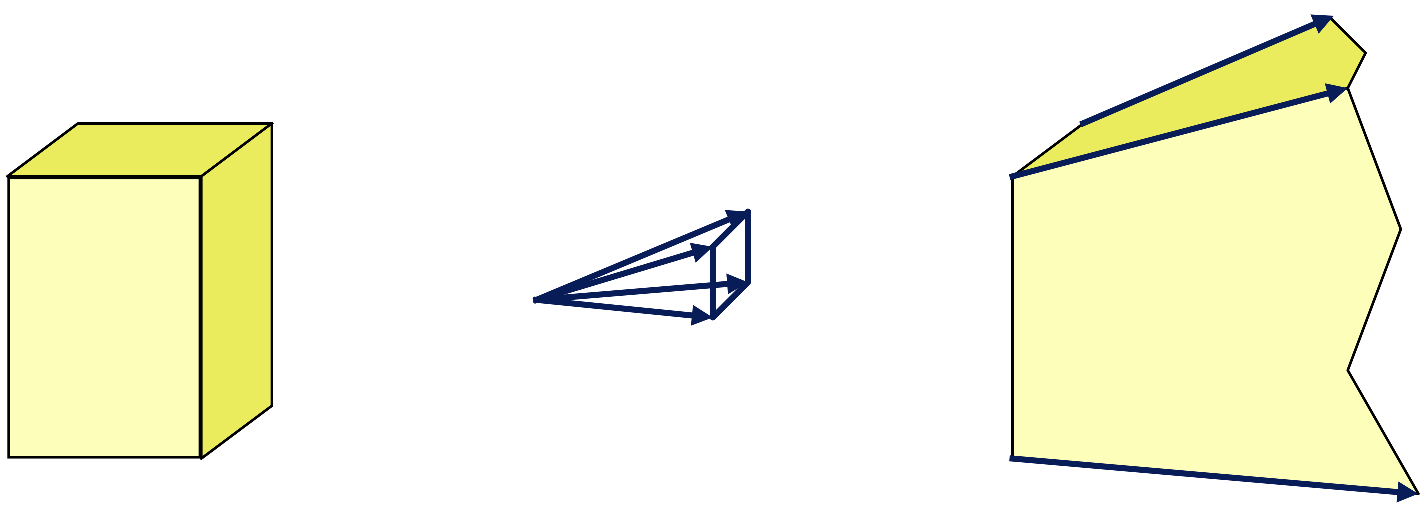
5D klasifikace paprsků

- paprsky ve scéně mají **5 stupňů volnosti**:
  - **počátek P_0 - [x, y, z]**
  - **směr [φ, θ]**
- **5D hyperkrychle** se rozdělí na **buňky**
  - každá buňka obsahuje seznam objektů, které mohou být paprskem z daného svazku („beam”) zasaženy
  - adaptivní dělení (slučování sousedních buněk se stejnými nebo podobnými seznamy)
- **6D varianta**: urychlení výpočtu animační sekvence

Klasifikace paprsků



počátek (2–3D) + směr (1D, 2D) = svazek



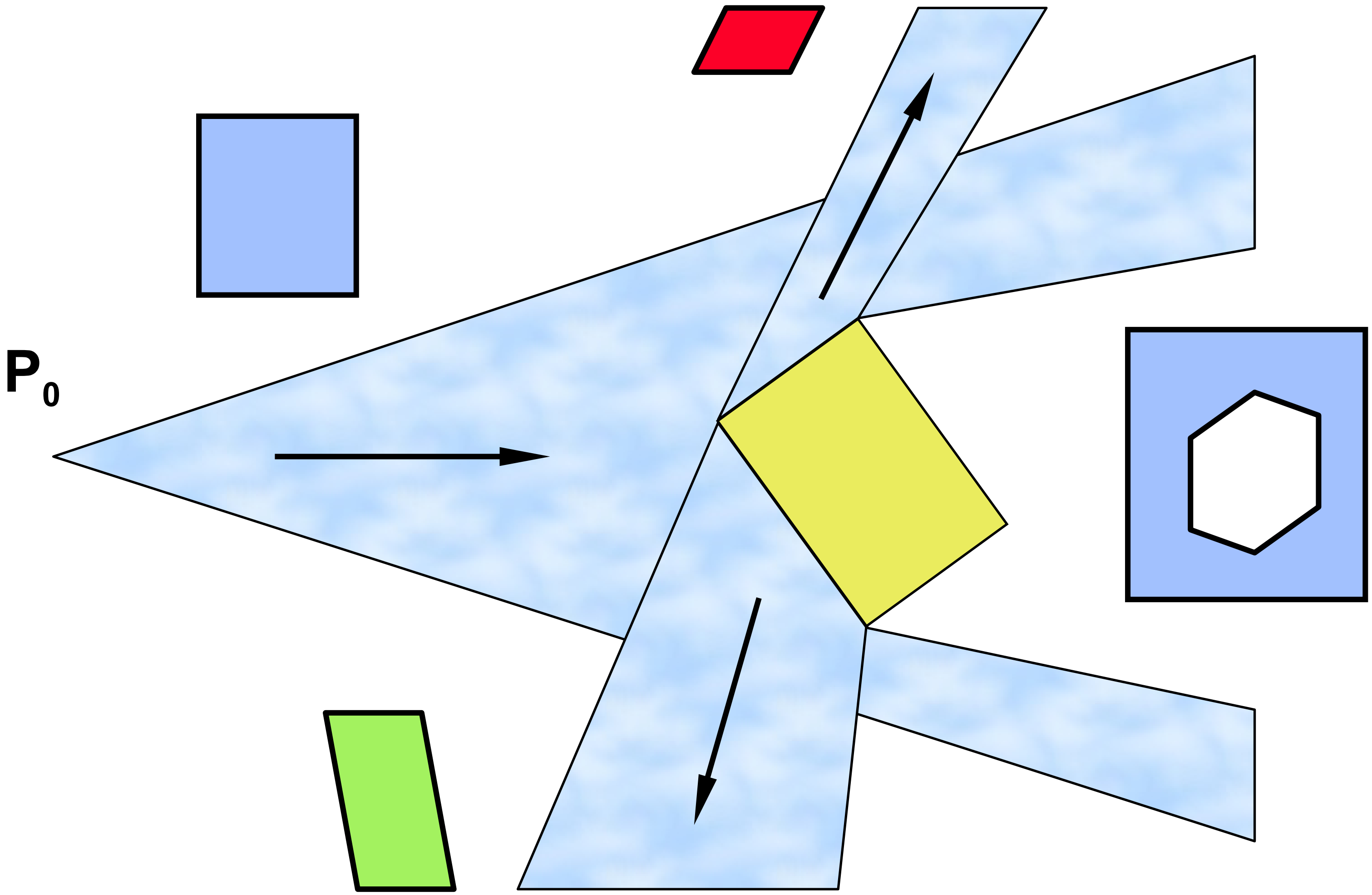
Adresář v průmětně

- urychluje **primární paprsky**
- průmětna se (adaptivně) rozdělí na **buňky**
  - v každé buňce zjistím potenciální viditelnost jednotlivých těles scény (spolu s pořadím)
  - některé buňky mohou být zcela zakryty jedním tělesem (obtížně se testuje – „vepsaná tělesa”)
- ➡ robustní varianta **algoritmu viditelnosti**
  - může pro většinu pixelů bezpečně určit zasažené těleso

Zobecněné paprsky

- spočítám najednou více informace než **f(x,y)**
  - pro <u>vyhlazování</u> (odhad integrální střední hodnoty) nebo <u>měkké stíny</u> (podíl zastínění)
  - vždy musím obětovat obecnost scény
- různé tvary **zobecněných paprsků**
  - rotační nebo eliptický kužel, pravidelný jehlan
  - jehlan s <u>polygonálním průřezem</u> (scéna složená pouze z polygonů)

Polygonální scéna



Literatura

- **A. Glassner**: *An Introduction to Ray Tracing*, Academic Press, London 1989, 201-262
- **A. Watt, M. Watt**: *Advanced Animation and Rendering Techniques*, Addison-Wesley, Wokingham 1992, 233-248
- **V. Havran:** *Heuristic Ray Shooting Algorithms*, PhD práce, FEL ČVUT Praha, 2001
- **P. Konečný:** *Obalová tělesa v počítačové grafice*, diplomová práce, Masarykova univerzita, Brno 1998

Literatura II

- **J. Klosowski, M. Held, J. Mitchell, H. Sowizral, K. Zikan:** *Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-dops*, IEEE Transactions on VaCG, 21–36, January-March 1998
- **H. Samet:** *Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures*, Morgan Kaufmann, 2006
- **H. Samet:** *The Design and Analysis of Spatial Data Structures*, Addison-Wesley, 1990